



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# OPTIMALIZACE NC PROGRAMU POMOCÍ CAD/CAM SOFTWARE

OPTIMIZATION OF NC PROGRAM USING CAD/CAM SOFTWARE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Jan Paseka

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jan Paseka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Optimalizace NC programu pomocí CAD/CAM software**

v anglickém jazyce:

### **Optimization of NC program using CAD/CAM software**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizace řezných procesů je dnes velice skloňovaným tématem ve všech strojírenských podnicích. Moderní obráběcí materiály dovolují posunovat řezné podmínky výše, v praxi se pak naráží na strop ve formě obráběného polotovaru a jeho materiálových charakteristik. Jedním ze způsobů jak optimalizovat NC program je zavedení interních standardů a využití CAD/CAM softwaru.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor součástkové základny.

Rozbor stávajících NC programů.

Možnosti optimalizace řezných podmínek.

Návrh optimalizace NC programů pomocí CAD/CAM softwaru.

Technico-ekonomické zhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.

SVOBODA, Emil. Technologie a programování CNC strojů. 1. vydání. Havlíčkův Brod: FRAGMENT, 1998, 278 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 3.2.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je návrh úsporných opatření v procesu technologické přípravy výroby průmyslového podniku. V první části je zpracován obecný teoretický rozbor součástkové základny a stávajících NC programů. Na základě těchto poznatků a provedené analýzy byly stanoveny návrhy optimalizace popsané ve druhé části. Díky těmto návrhům dochází při jejich plné implementaci k úspoře časových nároků a finančních prostředků potřebných pro zavedení prototypového výrobku do sériové produkce.

### Klíčová slova

hliníkové slitiny, NC/CNC, NC programy, CAD/CAM, post processing, makra

## ABSTRACT

Tendency of this master thesis is a proposal of savings in the process of technological production's preparation in a manufacturing company. In the first part is elaborated general theoretical study of current components and NC programs. Based on this, and finished analysis was defined optimization's proposals described in second part. Thanks this complete proposals comes to time and money savings, which are needed for implementation of prototype project into serial production.

### Key words

aluminum alloys, NC/CNC, NC programs, CAD/CAM, post-processing, macros

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PASEKA, J. *Optimalizace NC programu pomocí CAD/CAM software*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **OPTIMALIZACE NC PROGRAMU POMOCÍ CAD/CAM SOFTWARE** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

17.5.2014

Datum

Bc. Jan Paseka

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a společnosti IFE-CR, a.s. za poskytnutí prostoru pro její vypracování. Dále bych rád tímto poděkoval také Martině Ritzové, která mě podpořila v těžkých chvílích.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD .....	10
1 Rozbor součástkové základny.....	11
1.1 Společnost IFE-CR, a.s. ....	11
1.1.1 Historie společnosti.....	11
1.1.2 Výrobní portfolio .....	12
1.2 Hliníkové slitiny použité ve výrobním procesu .....	15
1.2.1 Vlastnosti hliníku .....	16
1.2.2 Výroba hliníku .....	16
1.2.3 Hliník a koroze.....	17
1.2.4 Slitiny hliníku .....	17
1.2.5 Výroba a použití lisovaných profilů .....	18
1.2.6 Tepelné zpracování .....	18
1.3 Nástrojové materiály .....	19
1.3.1 Povlakování nástrojů.....	20
2 Rozbor stávajících NC programů .....	22
2.1 Technologie NC, CNC .....	22
2.1.1 Přenosová média .....	22
2.1.2 DNC jako náhrada přenosových médií.....	23
2.2 CAD systémy .....	24
2.3 CAM jako podpora výroby .....	25
2.3.1 EdgeCAM .....	26
2.3.2 FSTSolid/FomCAM.....	27
2.3.3 PTC ProEngineer/Creo .....	28
2.4 Řídicí systémy .....	29
2.4.1 Sinumerik.....	29
2.5 ISO kód (G-kód, M-kód).....	30
2.5.1 Adresové znaky funkce programu .....	31
2.5.2 Přípravné funkce .....	31
2.6 Geometrické základy.....	32
2.6.1 Souřadné systémy .....	32

2.6.2	Korekce nástroje .....	33
2.7	Post procesor .....	34
2.7.1	Možnosti úpravy post procesoru .....	35
2.7.2	Výstupní soubory .....	36
2.8	Příprava NC programu ve společnosti IFE-CR, a.s. ....	36
2.9	Analýza stávajícího NC programu .....	37
3	Možnosti optimalizace řezných podmínek .....	39
3.1	Optimalizace výrobních nákladů a časů .....	39
3.1.1	Optimální řezná rychlost .....	39
3.1.2	Optimální trvanlivost břitu .....	40
3.1.3	Trvanlivost břitu nástroje .....	41
3.2	Obrobitelnost hliníkových slitin .....	43
3.3	Obrábění lisovaných profilů .....	44
3.3.1	Vrtání .....	45
3.3.2	Frézování .....	46
3.4	Možnosti optimalizace řezných podmínek v IFE-CR, a.s. ....	46
4	Návrh optimalizace NC programu pomocí CAD/CAM softwaru .....	48
4.1	Optimalizace NC programu .....	48
4.2	Post procesing a generovaný NC program .....	49
4.2.1	Požadavky výroby na generovaný NC program .....	49
4.2.2	Vizualizace .....	50
4.3	Upínací plán sestavy .....	51
4.3.1	Doplňující informace .....	51
4.3.2	Formát upínacího plánu .....	52
4.4	Šablona obráběcí sestavy .....	53
4.4.1	Rozvržení a vizualizace .....	53
4.4.2	Simulace řezného procesu .....	55
4.4.3	Zadání řezných podmínek .....	56
4.4.4	Ověření vytvořených sekvencí .....	57
4.4.5	Automatizace rutinních činností .....	59
5	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	61
5.1	Shrnutí optimalizace .....	61
5.2	Výpočet úspor po optimalizaci .....	61
	DISKUZE .....	63
	ZÁVĚR .....	64



SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	65
SEZNAM PŘÍLOH.....	71

## ÚVOD

Ještě před několika málo lety byla ve výrobních podnicích skloňována dvě hlavní témata. Probíhající krize a na ně navazující opatření, která měla za úkol přinést požadované úspory tak, aby byla výroba efektivnější. O ekonomické krizi se již v dnešní době nedá hovořit, nicméně zaváděná opatření a zaměření na ně, zůstalo tématem číslo jedna ve vrcholovém podnikovém managementu. Efektivita výrobního a navazujících procesů je vyhodnocována pomocí tzv. klíčových ukazatelů výkonu (dále jen KPI), které vyjadřují například spolehlivost včasných dodávek, kvalitu výrobku, efektivitu lidské práce a strojního zařízení, produktivitu, efektivitu normování, atd. Hodnoty KPI nehrají svou roli pouze v rámci interní politiky společnosti, ale jde o součást vyjednávací strategie při nabídkovém řízení se zákazníkem. Jednoduše řečeno z pohledu zákazníka, čím lepší ukazatele, tím je vyšší pravděpodobnost efektivnějších a spolehlivějších dodávek.

Základním kamenem při zefektivňování produkce je zavádění sofistikovaného výrobního systému s potenciálem nulového plýtvání. Jako vzor bývá používán Toyota Production Systém (TPS), který položil základy tzv. štíhlé výroby a téměř všechny velké koncernové podniky jej převzaly a upravily pro potřeby jejich produktu. Kromě TPS se tak dnes máme možnost setkat s odnožemi jako Bosch Production System, Siemens Production System, Knorr Production System, atd. Principy štíhlé výroby jsou převáděny ve velké míře také do nevýrobních fází, díky čemuž je možné pružně reagovat na zákaznické i výrobní požadavky – například ve formě změnového řízení dílu.

Dalším krokem při snižování nákladů na výrobu je optimalizace výrobního procesu, nejčastěji ve formě redukce výrobních časů zvyšováním řezných rychlostí a použitím progresivnějších nástrojů. Při implementaci těchto opatření se však často naráží na fyzické limity výrobních strojů nebo omezení v podobě kombinace nástrojů, polotovaru a materiálových charakteristik. Možným řešením, které se nabízí je výroba dílu pomocí jiné, modernější a výkonnější technologie. To však sebou nese potřebu investic, v mnoha případech v řádech až několika desítek mil. Kč. Oblastí s velkým úsporným potenciálem, která je však neprávem opomíjena, je čas strávený na přípravě výrobní dokumentace, tvorbě NC programů a vzorkování.

Technická příprava výroby je dnes jednou z klíčových částí výrobního procesu. Úkolem konstrukce a technologie je najít a využít vhodné metody, jak racionalizovat a optimalizovat vyráběný produkt takovým způsobem, aby se výsledné výrobní náklady snížily na nezbytné minimum. Do jednotlivých kusových nákladů tudíž nespadá pouze cena vstupního materiálu, řezných nástrojů, náklady na obsluhu a energie, ale také náklady na technickou přípravu výroby rozúčtovaných do produktu formou režie.

Tato práce se zabývá optimalizací technologických podmínek, zavedením interních standardů a periodicky se opakujících sekvencí (makra) pro technologii obrábění na pracoviště obrobny, ve firmě IFE-CR, a.s., která se zabývá výrobou nástupních systémů pro kolejová vozidla. Prioritně je při tom přihlédnuto k využití dosavadních zkušeností a dostupného softwarového i hardwarového vybavení v rámci koncernu. Následující kapitoly budou zaměřeny na teoretickou část technologie obrábění, přípravy NC programu, charakteristickým vlastnostem obráběného materiálu, výrobním portfoliu, analýzu současného stavu a návrh a implementace optimalizovaných řešení, zvyšujících efektivitu TPV.

# 1 ROZBOR SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

## 1.1 Společnost IFE-CR, a.s.

Firma IFE-CR, a.s. patří k nejvýznamnějším dodavatelům automatizovaných dveřních systému do drážního průmyslu, které můžete dnes nalézt na kolejových vozidlech po celém světě, především v Evropě, Severní Americe, Rusku, Jihoafrické republice a Austrálii. Jejich výrobky jsou ceněny především pro svou jakost, včasnost dodávek a technologickou preciznost. Vstupní systémy se montují ve formě zástavbových modulů do karoserií vlaků ve výrobním depu zákazníka. Mezi hlavní zákazníky společnosti IFE-CR, a.s. patří tzv. velká trojka – Siemens, Alstom Transportation a Bombardier Transportation. Do popředí se jako významný zákazník dostává také polská společnost PESA Bydgoszcz SA, která v posledních letech významně expandovala a svými tramvaji a příměstskými vlaky omlazuje nejen lokální tratě střední a východní Evropy. [1] [2] Na obr. 1.1 je zobrazena jedna z posledních vyrobených vlakových jednotek společnosti PESA.



Obr. 1.1 Dieselová jednotka ATR 220 [2].

### 1.1.1 Historie společnosti

Původně rakouská firma byla založena roku 1947 ve Vídni jako „Institut für Technische Forschung und Entwicklung“, která se zabývala především vývojem a výrobou speciálních zařízení pro rakouské průmyslové firmy. V roce 1996 byla na základech společnosti Hády-Metall založena společnost IFE-CR, a.s., kam byla převedena výroba a technologické zázemí dveřních systému z rakouského Waidhofenu. Na přelomu let 1997-2001 se začala aktivně o společnost zajímat německá firma Knorr-Bremse, GmbH, která nakonec odkoupila 90% podíl ve firmě IFE AG – divize dveřní systémy. Firma IFE se nakonec rozdělila na dvě samostatné společnosti – dveřní systémy a průmyslová zařízení. Původní zkratka IFE tak pro nový podnik dostala nový význam - „Innovations For Entrance Systems“. [1] [3] Loga společností IFE-CR, a.s. a koncernu Knorr-Bremse, GmbH jsou uvedena na obr. 1.2.

Vzhledem k faktu, že byla společnost IFE-CR, a.s. v roce 2001 stanovena jako hlavní dodavatel dveřních systémů, došlo o rok později k přestěhování výrobních prostor do nově zřizovaného CT parku v Modřicích, který nabízel větší variabilitu při požadavcích na větší výrobní kapacitu. K dalším významným milníkům společnosti patří certifikace společnosti dle standardu DIN EN ISO 14001:2009 v roce 2004, certifikace společnosti dle standardu IRIS (certifikát dodavatele drážních systémů) v roce 2008 a v neposlední řadě o rok později certifikace společnosti pro lepení kolejových vozidel a jejich dílů dle DIN 6701

třída A1 a standardu OHSAS 18001:2007. V tomtéž roce také došlo k přemístění rakouské centrály z města Waidhofen do nového sídla v Kematenu. [4] [5]



Obr. 1.2 Loga společnosti IFE-CR, a.s. a koncernu Knorr-Bremse, GmbH [1].

V Modřicích (obr. 1.3) je dnes tedy lokalizována výroba kompletních nástupních systémů a další oddělení, která jsou s výrobou úzce spjata jako například: konstrukční oddělení výrobní dokumentace, oddělení technické přípravy výroby, plánování, logistika, nákup, apod. Vývoj nových produktů probíhá v úzké česko-rakouské spolupráci, přičemž oddělení vývoje, stejně jako obchodní oddělení je pak lokalizováno v rakouském Kematenu.



Obr. 1.3 Pohled na novou výrobní halu firmy IFE v Modřicích [6].

Samostatnou kapitolou jsou dodávky pro pokrytí potřeb asijského trhu - včetně toho největšího – čínského. Speciálně pro tento trh, byla v roce 2006 ve městě Qingdao (provincie Shandong) otevřena pobočka IFE-Victall.

### 1.1.2 Výrobní portfolio

Jak již bylo výše naznačeno, firma IFE-CR, a.s. je schopna svými výrobními technologiemi pokrýt celé spektrum typů kolejových vozidel. Od nejjednodušších konstrukcí pro tramvaje, přes kombinované sendvičové konstrukce dveří pro metro a příměstské vlaky až po dveře pro rychlovlaky, které musí odolávat nejvyšším kombinovaným namáháním, ke kterým dochází při vjezdu vlaku do tunelu nebo při míjení dvou protijedoucích vlaků. [4]

Výrobní prostory jsou rozděleny do jednotlivých segmentů, které zpracovávají vlastní typy produktů. Výroba dveří probíhá třífázově – výroba a montáž surového dveřního křídla na segmentu RAW, lakování v kooperaci, a finální montáž a sklení dveřních křídel na segmentu FINAL. Konstrukci dveřních křídel není možné pro lepší popis zobecnit, poněvadž záleží na tom, zdali jsou určena pro tramvaje, metro nebo rychlovlak. Dveřní křídlo je běžně tvořeno čtyřmi tenkostěnnými profily, ze kterých je posléze vytvořen nosný rám. Profily v rámu jsou rozlišeny na horní a spodní příčný profil (dále jen QP) a přední a zadní podélný profil (dále jen LP). Označení profilů v rámu odpovídá pohledu cestujícího z vnitřního prostoru vagónu s tím, že jako výchozí je bráno pravé křídlo, pokud se jedná o dvoukřídlovou sestavu. Průřezový profil materiálu je důmyslně konstruován s ohledem na typ určení dveří a provozní podmínky vlakové soupravy, aby poskytoval prostor pro odvod dešťové vody a kondenzátu z vnitřního prostoru dveří a nedocházelo tak ke korozi. [6]

Mezi základní typy dveří patří [5]:

- rámové
  - rovné (obr. 1.4),
  - lomené,
  - ohýbané.
- sendvičové dle tvaru
  - rovné,
  - lomené (obr. 1.7),
  - ohýbané (obr. 1.6).
- sendvičové dle výplně
  - pěněné (obr. 1.6),
  - s voštinou (obr. 1.7),
  - s výplní AIREX®.

Na pracovišti obrobny, označované MECHO, probíhá obrábění hliníkových profilů na základě zakázek, jejichž průměrná velikost je 10ks. Normový kusový čas je v průměru 10 min a průměrný čas přetypování zakázky činí 48 min. Celkem existuje něco přes 4000 různých artiklů pro obráběné díly, aktivně využívaných (v rámci objednávek) jich je však něco okolo 1100. V tomto případě lze tedy mluvit o malosériové výrobě s velkou variabilitou zakázek. Celková roční produkce přesahuje 20 000 dveřních křídel. [5] [6]

Obrobna je vybavena čtyřmi vertikálními obráběcími centry značky AXA a jedním strojem značky CHIRON se stejnou koncepcí. U prvních třech strojů značky AXA (označeny AXA1, AXA2, AXA3) se jedná o tříosá obráběcí centra doplněna o čtvrtou indexovanou osu v podobě otočného stolu. Stroje jsou ovládány řídicím systémem Sinumerik 840C. Čtvrtý stroj AXA (označen jako AXA5) je dovybaven indexovaným polohováním vřetene, což zajišťuje větší možnosti při výrobě. Jako řídicí systém je v tomto stroji instalován Sinumerik 840D. Ukázka stroje AXA je uvedena na obr. 1.5.

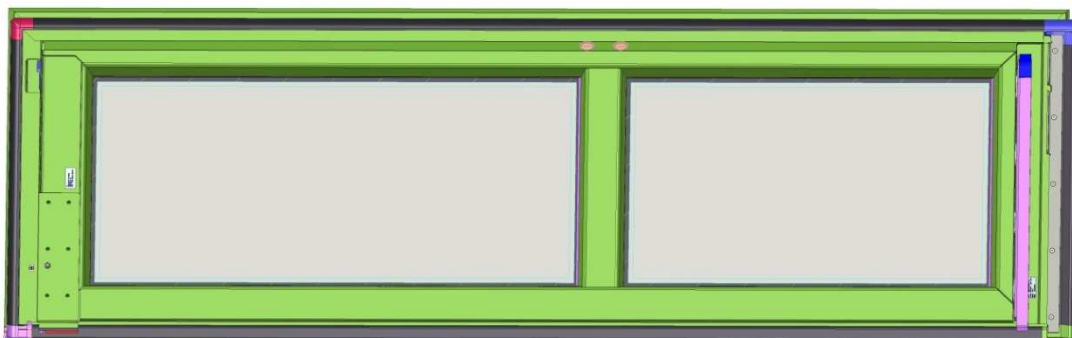
Poslední, CHIRON, je stejně jako AXA5 vybaven doplňujícími dvěma indexovanými osami, nicméně díky modernější konstrukci a řídicímu systému je možné řídit všech pět os



plynule, a obrábět tak například složité tvarové plochy nebo vybrání. Řízení probíhá skrze Sinumerik 840D, doplněný o příkaz CYCLE800, který kombinuje transformaci souřadných systémů, polohu stolu a vřetene. Tento příkaz není dostupný při plném pětiosém řízení, kde je nezbytné mít vytvořen program s inkrementy ve všech programovatelných osách.

Různé řídicí systémy přinášejí do výrobního procesu úskalí, se kterými je nutné počítat. Při zavádění prototypového projektu je na základě technologických požadavků a kapacitních rezerv v plánování stanoven stroj, který bude primárně určen k výrobě daného dílu a následně na něm proběhne vzorkování. Zdrojové soubory CAM systému jsou archivovány na serveru. V případě potřeby balancování linky lze vygenerovat NC program na další stroje, pokud je to technologicky možné.

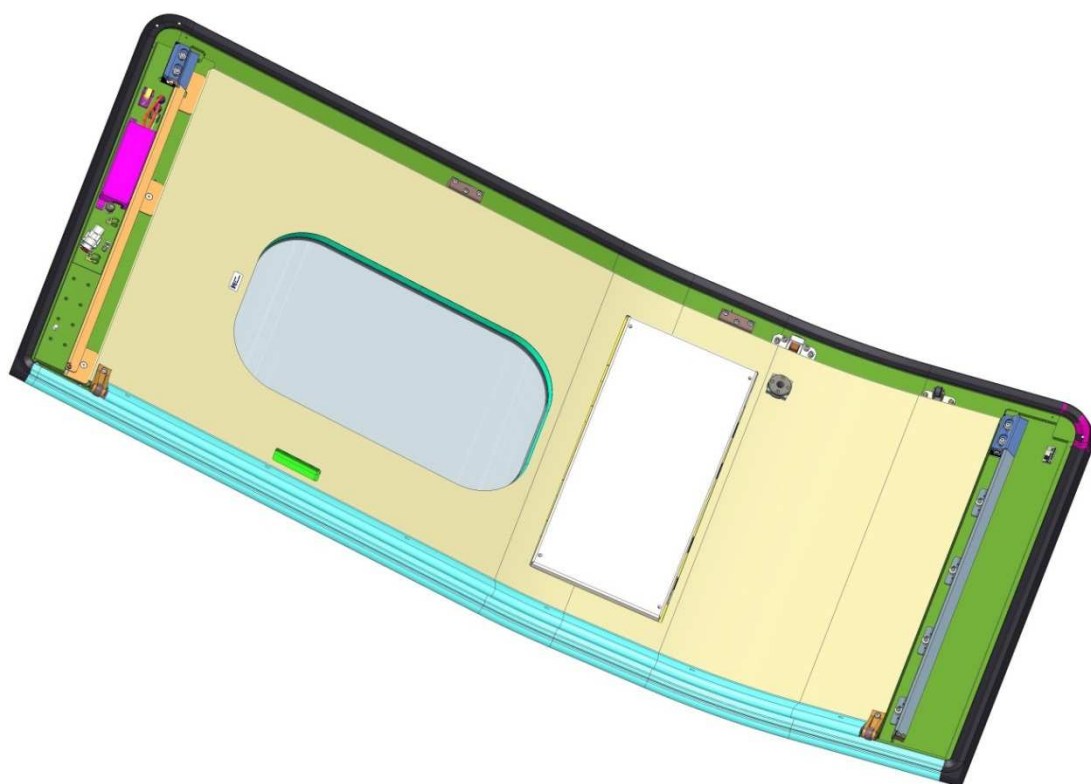
V současné době (duben 2014) probíhají přípravy pro prezentaci nejnovějších typů produktů na veletrhu kolejových vozidel a technologií Innotrans 2014, který se koná 23.-26. září 2014 v Berlíně. [6]



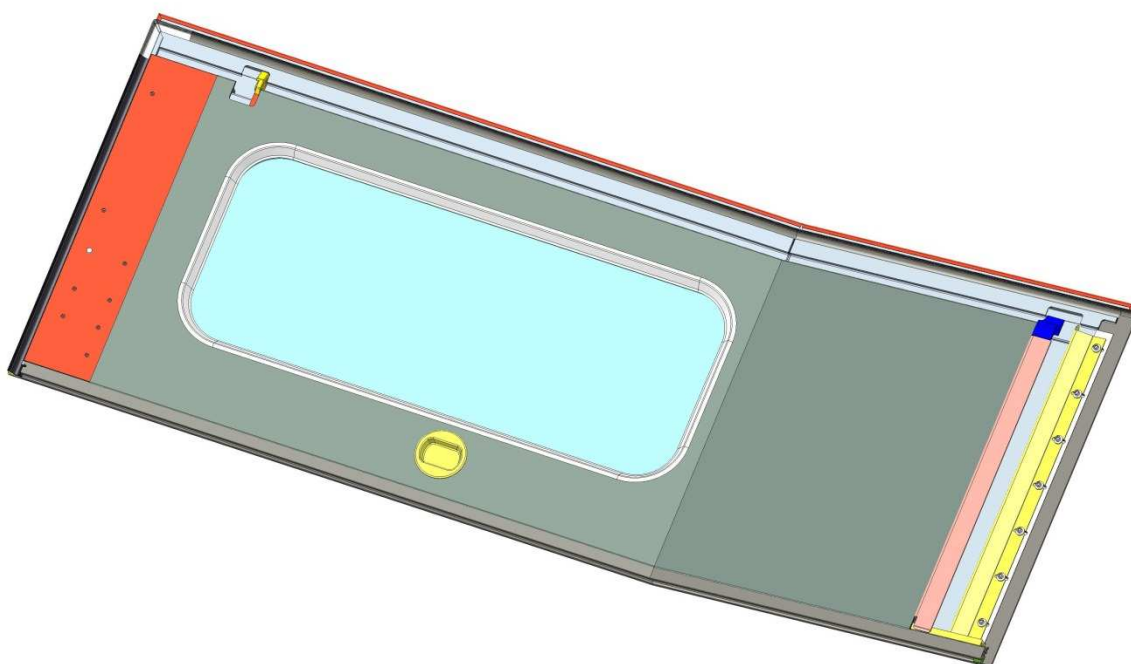
Obr. 1.4 Ukázka rovných rámových dveří (zobrazeny horizontálně) [6].



Obr. 1.5 Stroj AXA.



Obr. 1.6 Ukázka ohýbaných sendvičových dveří (pootočené zobrazení) [6].



Obr. 1.7 Ukázka lomených sendvičových dveří (pootočené zobrazení) [6].

## 1.2 Hliníkové slitiny použité ve výrobním procesu

Slitiny hliníku jsou po oceli druhým nejvíce používaným kovem na světě. Důvodem je kombinace jeho jedinečných vlastností, jako jsou nízká hmotnost, vysoká pevnost, vynikající tvarovatelnost, relativně lehká obrobitelnost, vynikající odolnost vůči korozi a dobrá tepelná a elektrická vodivost.

### 1.2.1 Vlastnosti hliníku

Hliník je bělavě šedý nepolymorfní paramagnetický kov, dobře tvařitelný díky krystalizaci v soustavě FCC, s nízkou měrnou hmotností a teplotou tání 658°C. Pokud jsou slitiny hliníku trvale vystaveny teplotám nad 100°C je pevnost materiálu ovlivňována až do té míry, že je potřebné uvažovat s narušením struktury materiálu. Na druhou stranu při teplotách nižších než 5°C materiál nekřehne, namísto toho se jeho pevnost zvyšuje. [7] Charakteristické vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Charakteristické materiálové hodnoty hliníku.

Hustota	kg.m <sup>3</sup>	2700
Teplota tání	°C	658
Teplota varu	°C	2519
Tepelná vodivost	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	237
Koeficient délkové roztažnosti	K <sup>-1</sup>	$24 \times 10^{-9}$
Elektrická vodivost	S.m <sup>-1</sup>	$37,7 \times 10^6$
Elektrický odpor	Ω.m	$29 \times 10^{-9}$
Tažnost	%	20-30 (vyžíhaný stav)
Tvrdost	HB	20 (vyžíhaný stav)
Rychlost zvuku	m.s <sup>-1</sup>	5000
Modul pružnosti v tahu	GPa	71 (vyžíhaný stav)
Mez pevnosti v tahu	MPa	70 (vyžíhaný stav)
Mez kluzu	MPa	20 (vyžíhaný stav)

### 1.2.2 Výroba hliníku

Ačkoliv tvoří sloučeniny hliníku v různých formách celých 8% zemské kůry, jeho průmyslové zpracování bylo patentováno teprve v roce 1886. Převrat v leteckém průmyslu, při stavbě vzducholodí a letadel způsobila v roce 1906 precipitačně vytvrditelná slitina hliníku zvaná dural s označením AlCu4Mg. [8]

Základní vstupní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit, jehož nejvýznamnější ložiska je možné nalézt v Austrálii, Rusku, Číně a rovníkových oblastech Brazílie, Jamajky a Surinamu. Jedná se o směsici několika minerálů zahrnující hydroxidy hliníku, křemík, oxid hlinitý a oxidy železa. Vzniká chemickým zvětráváním a rozpadem hornin, které obsahují silikáty hliníku v suchozemském prostředí. [9]

Bauxit se zpracovává na oxid hlinitý běžně v těsné blízkosti dolu. Ruda prochází poměrně složitým výrobním postupem, na jehož konci vzniká bílý prášek podobný cukru – oxid hlinitý. Ze 4 kg bauxitu je možné získat 2 kg oxidu hlinitého, ze kterého nakonec vznikne přibližně 1 kg čistého hliníku. Samotná výroba hliníku elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého je situována v oblastech s dostatečnými dodávkami elektrické energie, poněvadž k elektrolytickému rozkladu 1 kg kovu je použita energie okolo 47 MJ, což přibližně odpovídá 13 kWh. [8]

Hliníkový odpad, který je možné znova a znova recyklovat je velice hodnotná surovina, poněvadž energie potřebná pro její zpracování dosahuje pouze 5% původní spotřeby elektrické energie. [8]



### 1.2.3 Hliník a koroze

Hliník má vysokou afinitu ke vzdušnému kyslíku v podobě  $O_2$ , díky čemuž dochází ke vzájemné reakci a vytváří se extrémně tenká vrstva  $Al_2O_3$ , která nedovoluje další postup tohoto procesu do hloubky. I když má tato vrstva jen několik setin  $\mu m$ , díky své hustotě poskytuje vynikající ochranu před korozí. V případě poškození této vrstvy dojde okamžitě k jejímu obnovení. Pro posílení ochrany vyrobeného dílu před vnějšími vlivy se používá proces anodické oxidace hliníku, známým též pod pojmem eloxování, který zesiluje povrchovou vrstvu oxidu na 3 až 25  $\mu m$ . Takto vzniklý povlak je mimořádně odolný v neutrálním a slabě kyselém prostředí. V silně kyselých a zásaditých prostředích probíhá koroze naopak velice rychle. Tloušťka výsledné vrstvy závisí především na oblasti použití a požadavcích zákazníka. Zesílená vrstva oxidu neslouží pouze jako ochrana, ale také jako elektricky izolační povlak, povrch odpuzující nečistoty, základ pro nanesení tiskových barev nebo designový a dekorativní prvek. Proces anodické oxidace má obvykle čtyři fáze: předúprava, anodická oxidace, barvení (pokud je vyžadováno) a utěsnění. [8]

### 1.2.4 Slitiny hliníku

Čistý hliník je poměrně měkký, a proto není úplně vhodný pro samostatné použití. Z tohoto důvodu je využíváno několik legujících prvků, podle kterých jsou vzniklé slitiny rozděleny do skupin (viz tab. 1.2). [10]

Tab. 1.2 Označení slitin hliníku a legujících prvků dle EN 573.

Kód slitiny	Legující prvek	Typ slitiny	Popis
Skupina 1000	žádný	nevytvrditelná	
Skupina 2000	měď	vytvrditelná	duraly nejstarší slitina dnes pouze 2 slitiny AlCu5 špatná zabíhavost špatná svařitelnost vysoká pevnost
Skupina 3000	mangan	nevytvrditelná	
Skupina 4000	křemík	nevytvrditelná	siluminy dobré mechanické vlastnosti dobře slévatelné vysoká pevnost tvrdost
Skupina 5000	hořčík	nevytvrditelná	hydronalia špatná slévatelnost dobrá obrobiteľnosť horší mechanické vlastnosti
Skupina 6000	hořčík + křemík	vytvrditelná	
Skupina 7000	zinek	vytvrditelná	
Skupina 8000	jiné		

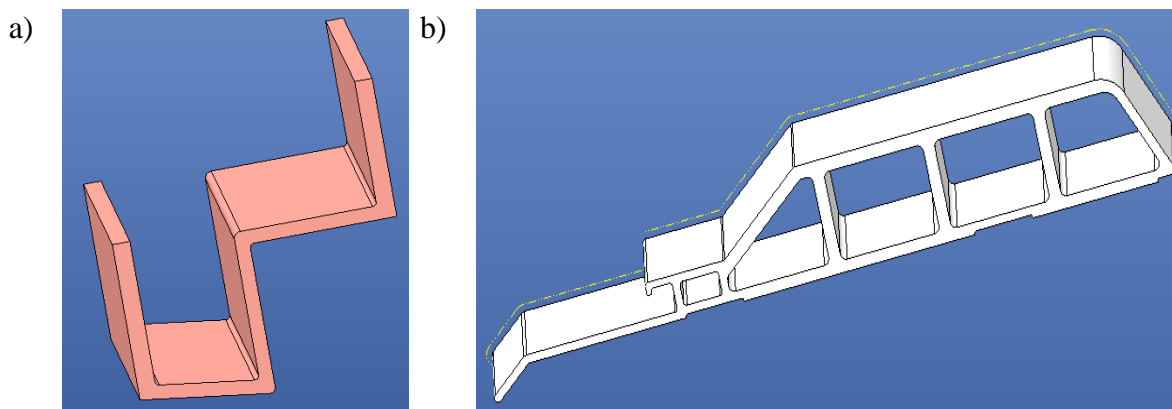
Mezi dnes nejběžněji používané konstrukční slitiny patří EN-AW-6060, EN-AW-6063, EN-AW-6005, EN-AW-6082.

### 1.2.5 Výroba a použití lisovaných profilů

Na počátku lisování se dlouhé válcové ingoty z hliníkové slitiny nařezou na kratší čepy. Průměr ingotů je odvislý od výsledné velikosti extrudovaného profilu, běžné jsou průměry okolo 100-300mm, výjimkou nejsou ani ingoty o průměru 500mm. Takto připravené čepy jsou umístěny do indukční ohřívací pece, kde jsou zahřáty na 450-500°C. Na ohřívací pec navazuje hydraulický lis, který za pomoci vysokého tlaku (12-60MN) protlačí předehřátý ingot přes lisovací nástroj - matrici. Profil se lisuje rychlostí 5-50 m.min<sup>-1</sup> a délka je běžně mezi 25-45m. Jakmile profil opustí lisovací nástroj, je ochlazován pomocí vzduchu nebo vodní stěny. Po ochlazení je profil napínán a rovnán tak, aby se uvolnila zbytková napětí a profil splňoval předepsané požadavky rovinnosti, přímosti, krutu a všech ostatních důležitých funkčních rozměrů a kvality povrchu. Pokud jsou požadavky na výsledný profil enormně vysoké, může se stát, že po rovnání je použito pouze asi 55% původní extrudované délky. Zbylý nevyhovující materiál mimo rozměrovou toleranci je recyklován a využit při zpracování dalších dávek. Konečné pevnosti materiálu je dosaženo prostřednictvím dalšího tepelného zpracování. [11]

Lisované profily můžeme rozdělit do dvou skupin podle jejich tvaru na otevřené a duté. Otevřené profily se vyrábí pomocí plochého lisovacího nástroje tvaru disku. Profily menších průřezů jsou na lisovací nástroj znásobeny tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity výrobního procesu, při zachování předepsaných tolerancí. Ukázka otevřeného profilu je na obr. 1.8 a). Duté profily se vyrábějí pomocí dvoudílné matrice – tzv. jádra a obalu. Jádro obsahuje trn nebo trny upevněné na můstcích. Materiál při lisování tyto trny obtéká podél můstku a tvaruje tak vnitřní dutinu profilu. Vnější tvar profilu je pak dotvořen obalovou částí matrice. Lisovací nástroje jsou vyráběny z nerezavějících ocelí, běžně X40CrMoV51, a jeho životnost je závislá na tvaru a požadované kvalitě povrchu. [8] Příklad dutého profilu je zobrazen na obr. 1.8 b).

Rozměrové tolerance lisovaných profilů upravuje norma ČSN EN 755-9, vztahující se na většinu slitin hliníku. Pro materiály EN-AW-6060 a EN-AW-6063 je při konstrukčním návrhu profilu možno použít přísnějších tolerančních polí v rámci normy ČSN EN 12020-2. [8]



Obr. 1.8 a) otevřený profil, b) uzavřený profil [6].

### 1.2.6 Tepelné zpracování

Podobně jako u jiných kovů je také u běžných hliníkových konstrukčních slitin zařazeno tepelné zpracování (TZ) k jejich zušlechtnění a zlepšení mechanických vlastností. [12] [8]

*Žíhání na měkko:* Prudké úplné přehřátí, vykonávané přibližně 30 min., při teplotě 380-420°C. Chlazení by mělo být pomalé a při teplotě 250°C, nejlépe v peci. Posléze volné chlazení.

*Rozpouštěcí žíhání:* Prudké úplné přehřátí, vykonávané přibližně 15-30 min., při teplotě cca 520°C. Nezbytné chlazení vzduchem, pokud je tloušťka stěny menší než 6mm, jinak vodou. Rychlost chlazení 1-2°C.s<sup>-1</sup>.

*Přirozené stárnutí:* Vzniká samovolně při pokojové teplotě. Tvrdosti T4 dosaženo po 48 hodinách.

*Umělé stárnutí:* Ohřívání na teplotu stanovenou pro tvrdnutí materiálu - 175°C, po dobu přibližně 8 hodin. Posléze volné chlazení.

#### **Stavy materiálu po TZ: [13]**

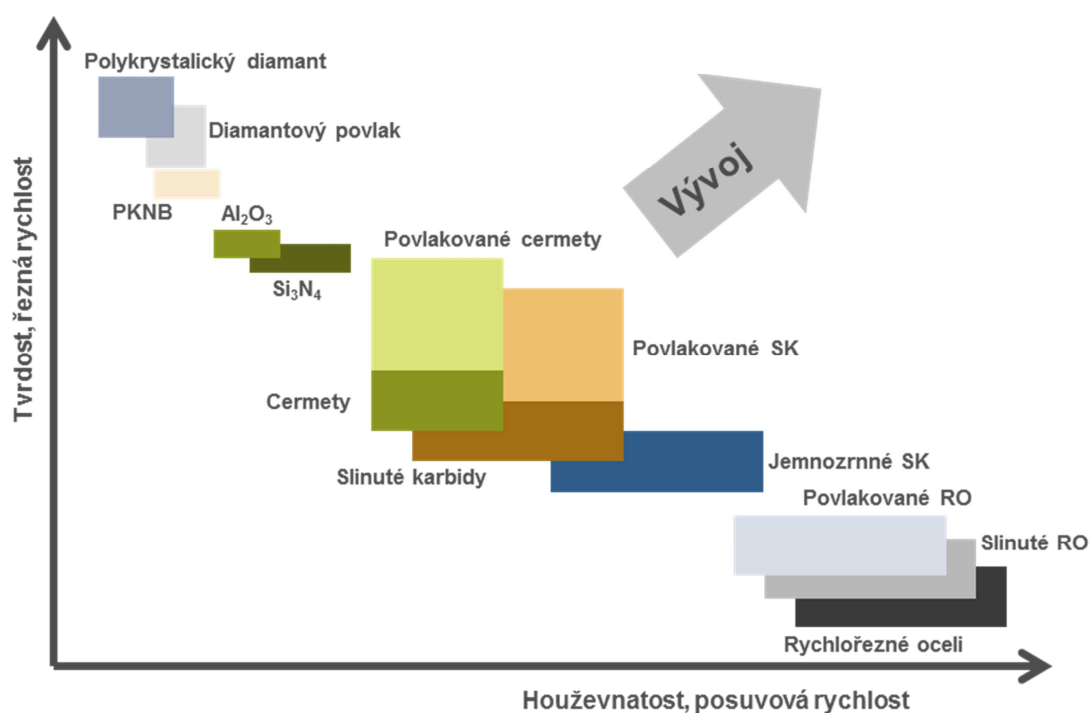
- T4 - rozpouštěcí žíhání a přirozené stárnutí,
- T6 - rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí,
- T61 - na maximální pevnost a tvrdost,
- T64 - na maximální houževnatost,
- T66 - rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí,
- T7 - s přestárnutím,
- T71 - přestárnutí do stabilizovaného stavu.

### **1.3 Nástrojové materiály**

Na základě dlouholetého celosvětového výzkumu je dnes možné pro různé aplikace zvolit ten nejvhodnější rezný materiál, který splňuje stále se zvyšující nároky na produktivitu obrábění. Nástrojový materiál musí splňovat mnohdy i protichůdné požadavky, z nichž nejdůležitější jsou [14]:

- tvrdost,
- odolnost proti opotřebení,
- tepelná vodivost,
- pevnost v ohybu,
- houževnatost.

V ideálním případě by měl nástrojový materiál splňovat tyto požadavky současně, v nejvyšší možné míře, při vysokých teplotách a po dostatečně dlouhou dobu. [14] [15] Proto je při výběru nástroje, jeho geometrie a rezného materiálu nezbytné přihlédnout k několika faktorům jako jsou rozměry, tvar a druh obráběného materiálu, technologie výroby polotovaru, tvar a druh řezu, finanční náročnost rezného materiálu, požadavky na kvalitu obroběného povrchu, apod. [15] Vývojový trend nástrojových materiálů je schematicky znázorněn na obr. 1.9.



Obr. 1.9 Vývojový trend nástrojových materiálů [15].

Mezi nástrojové materiály patří [14] [15]:

- nástrojové oceli nelegované,
- nástrojové oceli legované,
- rychlořezné nástrojové oceli,
- slinuté karbidy,
- řezná keramika,
- cermety,
- kubický nitrid bóru,
- diamant.

### 1.3.1 Povlakování nástrojů

Povlakování nástrojů slouží jako dodatečná ochranná vrstva břitů nástroje před opotřebením. Jeho podstatou je nanášení velmi tenké vrstvy nebo vrstev povlakových materiálů s vysokou tvrdostí na základní materiál (HSS, SK). Celková tloušťka povlakové vrstvy dosahuje hodnoty desítek  $\mu\text{m}$ . Díky jemnější zrnitosti a menšímu množství strukturních vad zlepšuje povlak řezné vlastnosti nástroje.

Pro povlakování nástrojů určených k obrábění hliníkových slitin nejsou vhodné vícevrstvé povlaky obsahující hliník. Typickým příkladem je povlak  $\text{TiAlN}$ . Po otěru svrchní ochranné titanové vrstvy dochází k zahřívání nosné vrstvy povlaku z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která má díky vysoké afinitě k obráběnému materiálu tendenci difundovat (viz obr. 1.10 b). Se zvyšující se teplotou a zmenšující se plochou ochranné Ti vrstvy se zvyšuje také rychlost difuze.

Následkem tohoto procesu vznikají na břitu nástroje nárůstky. [4] [15] Princip tvorby nárůstku je vidět na obr. 1.10 a).

Jako vhodnější alternativu je možné použít povlak TiCN, jež má vyšší odolnost při mechanickém namáhání břitu. Tento typ povlaku bývá ve standardní nabídce většiny dodavatelů nástrojů. [15]

Na základě provedených testů podle [4], bylo velice uspokojujících výsledků v oblasti povlakovaných nástrojů určených k obrábění hliníkových slitin dosaženo s pomocí povlaku AluSpeed® společnosti CemeCon, s.r.o., Ivančice. Jedná se o jednovrstvý povlak  $\text{TiB}_2$  s dosahovanou mikrotvrdostí 4000HV a maximální teplotou použití až 900°C. K hlavním výhodám patří jeho samomazný efekt v řezném procesu, schopnost kopírovat kontury ostrých řezných hran, nízká náchylnost k nárůstkům a nalepování materiálu. Tento povlak však není ve standardní nabídce dodavatelů řezných nástrojů, což s sebou přináší nutnost dodatečného povlakování a dodatečné náklady na dopravu. [4]

a)



b)



Obr. 1.10 a) princip tvorby nárůstku, b) nástroj s povlakem TiAlN poškozený vlivem difuze a vzniklým nárůstkem.

## 2 ROZBOR STÁVAJÍCÍCH NC PROGRAMŮ

### 2.1 Technologie NC, CNC

Na počátku 50. let vznikaly první číslicově řízené stroje, tzv. NC stroje. Jejich označení pochází z anglického názvu Numerical Control. K uchování programu se používala první přenosová média (viz kapitola 2.1.1 Přenosová média). Každý stroj je řízen vlastním řídicím systémem uloženým ve zvláštní skříni, umístěné v těsné blízkosti obráběcího stroje.

Na začátku 80. let 20. století byly s nástupem mikroprocesorové techniky vyvinuty tzv. CNC stroje. Jedná se o zkratku původního Computerized Numerical Control. Stroj je vybaven ovládacím panelem, opatřeným vlastním počítačem, displejem, a klávesnicí pro zadávání vstupních dat a řízení stroje. Další pokročilou funkcí je grafická simulace pohybu nástroje. Samostatné paměťové moduly umístěné v počítači umožňují uložení většího počtu programů. Další převrat způsobilo zavedení pevných cyklů – vrtání, závitování, frézování zámků a kapes, díky čemuž není nutné rozepisovat každý pohyb nástroje, ale stačí pouze zadat koncové body prvku a parametry. CNC stroje mohou pracovat ve třech režimech: ruční řízení pro seřízení stroje a nástrojů, blok po bloku při odladování prvního kusu a kontinuální pro sériovou výrobu součástí.

#### 2.1.1 Přenosová média

Výpočetní technika včetně záznamových médií prošla především v posledních deseti letech obrovským vývojem a původní nosiče informací tedy pomalu ustupují do pozadí. Prvním nosičem informací, který byl použit pro řízení NC strojů, je děrná páska. Jedná se o speciální papír nebo tenkou pokovenou plastickou hmotu ve formě dlouhé úzké pásky nebo širšího štítku, na který je pomocí speciálního zařízení proveden zápis NC programu. Pokud je nezbytné provést změnu programu, není jiné možnosti, než vyřezat nový pásek nebo štítek. Nevýhodou tohoto média je citlivost na teplo v případě plastické hmoty, a náchylnost na roztržení nebo vznícení v případě papíru. Každý znak je definován jedinečným ASCII kódem v binárním tvaru – 7 bitů představuje kód jednotlivých znaků, 8 bit je kontrolní. Standard ISO R840 má kontrolu sudou paritou a kód EIA RS244 má kontrolu na lichou paritu. Udávaná hustota zápisu pro 8 bitovou pásku je 15 znaků na 1 cm<sup>2</sup>. V současnosti jsou tato média využívána již jen ojediněle. [14]

Dalším využívaným médiem je magnetofonová páska. Ta umožňuje nahrávání informací a její předávání elektronickému zařízení přes magnetofon. Přenos z pásky je relativně spolehlivý a snímací zařízení je technicky dobře vyřešené, jednoduché a levné. Nevýhodou tohoto média je náchylnost na nečistoty, čtecí zařízení je nutné izolovat od okolí.

S nástupem mikroprocesorové techniky a osobních počítačů do řídicích obvodů obráběcích strojů již nebyl hlavní otázkou přenos informací do stroje. Pro tyto účely se začaly využívat standardní komunikační rozhraní – porty. Nejpoužívanějším standardem je sériové rozhraní RS232, známé též jako V24. Na rozdíl od síťové technologie ethernet nebo rozhraní USB se zde jedná o zcela bezkolizní fyzickou vrstvu. Principiálně se jedná o asynchronní sériovou komunikaci, u které probíhá přenos datových bitů od nejméně významného bitu po bit nejvýznamnější.

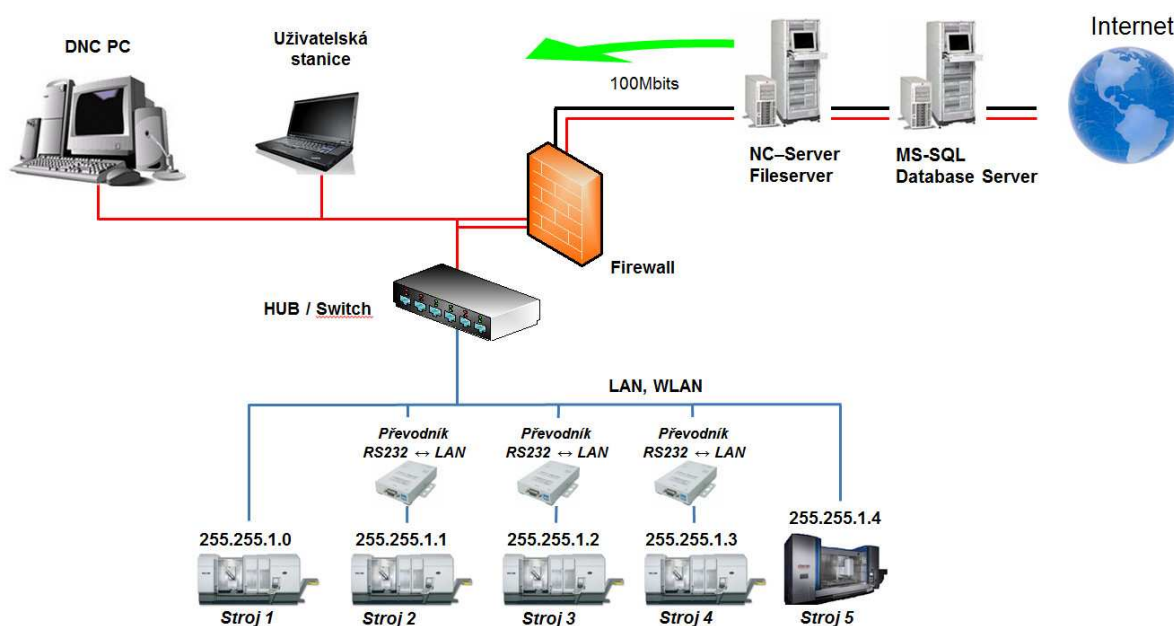
V dnešní době je primárně pro přenos NC programů do paměti nových CNC strojů využíván standard USB. Data jsou uchovávána na velkokapacitních externích HDD nebo pamětech typu FLASH. Sběrnice USB pracuje pouze s jedním zařízením typu master, tj. všechny aktivity vycházejí z PC. Data jsou vysílána v krátkých paketech o délce až

256bytů. Paralelně k tomuto rozhraní je obsazován také port LAN, umožňující připojení do vnitropodnikové sítě ethernet a sítě DNC.

S narůstajícími požadavky jsou dnes do NC programů zařazovány také bloky, které slouží pro komunikaci s DNC systémem, nebo ukládají informace o řezných podmínkách a průběžných výrobních časech do textových souborů.

### 2.1.2 DNC jako náhrada přenosových médií

Direct Numerical Control, též známé jako Distributed Numerical Control je společný výraz pro zajištění síťového propojení a vzájemné komunikace mezi obsluhujícími servery a CNC stroji. Původním důvodem tohoto počínu byla malá kapacita interních pamětí NC stroje, které nebyly schopny pojmout celý program (např. řádkování složitých tvarových ploch) a proto byl program uložen v samostatném počítači a do stroje byl zasílán blok po bloku v taktu sběrnice stroje. V dnešní době však již mají paměťové moduly dostatečnou kapacitu a hlavním důvodem zřizování těchto sítí je možnost řízení a archivace veškerých změn probíhajících na vyráběných dílech. [16] [17] Celá struktura je pomyslně rozdělena do třech jednotek, které mezi sebou komunikují pomocí TCP/IP protokolu (viz obr. 2.1). [18]



Obr. 2.1 Schéma rozložení DNC.

První jednotku tvoří CNC stroje připojené buď přímo, nebo skrze převodník k lokálnímu HUBu. Na straně strojů je nutné provést konfiguraci komunikačních portů, aby nedocházelo k rušení jednotlivých přenosů. Každý stroj má přidělenou jedinečnou IP adresu, která jej identifikuje při vzájemné síťové komunikaci. Novější verze řídicích systémů, běžících na OS Windows XP je možné lokalizovat z kteréhokoliv místa v síti a přistupovat na lokální disk stroje podobně jako na externí disk. [18]

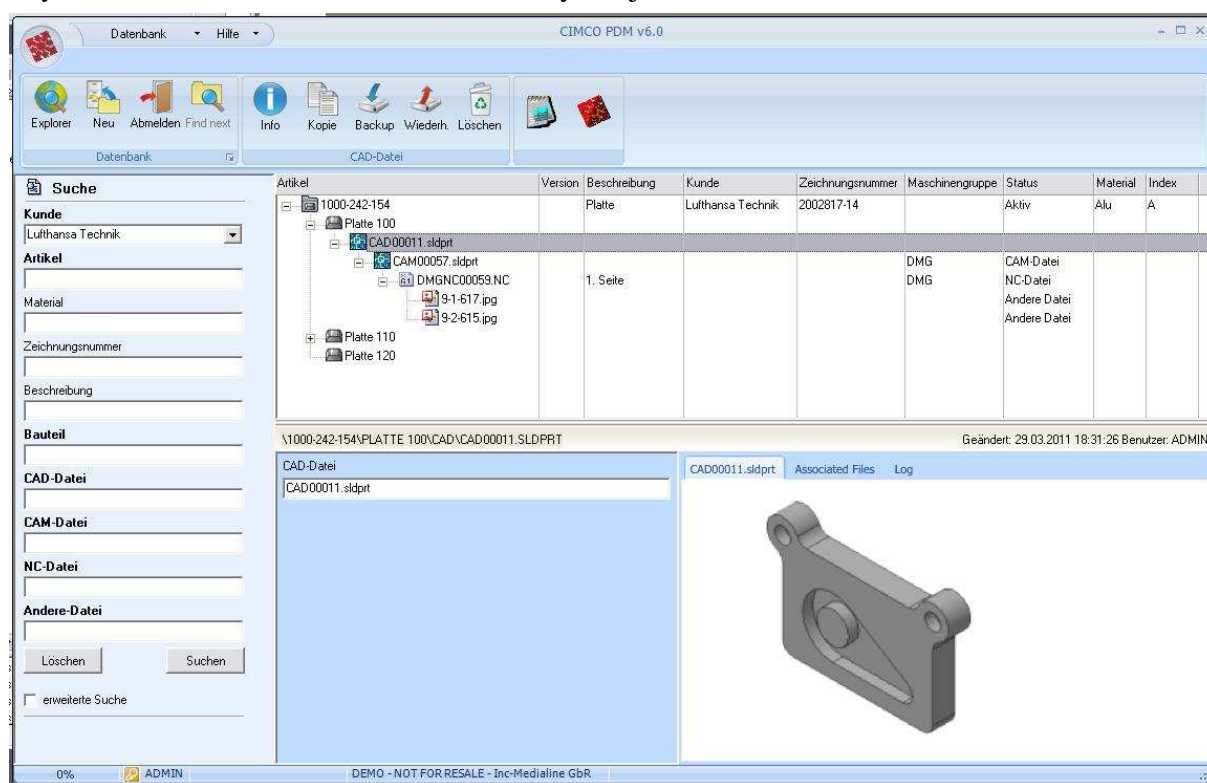
Druhou pomyslnou jednotku tvoří tzv. uzlový počítač DNC, jehož jediným úkolem je kontrolovat sběrnice všech připojených strojů a dle předem stanoveného algoritmu obsluhovat požadavky na přenos souborů. Algoritmus zajišťující stahování a nahrávání souborů se může lišit v závislosti na vývoji a řídicím systému stroje, obecně však jde o kombinaci interních funkcí CNC stroje, ISO kódu a obsluhujícího softwaru na straně



serveru. Tato jednotka také jako jediná komunikuje se souborovými a databázovými servery, zasílá na ně databázové dotazy a stahuje aktuální uvolněná data. [18]

Poslední jednotku tvoří databázový server obsluhující databázové dotazy DNC aplikace a souborový server, fungující jako archiv. [18]

Jedním z úsporných řešení, která v dnešní době společnosti implementují do svého výrobního procesu, jsou tzv. bezpapírová pracoviště. K tomuto účelu byl vyvinut tzv. PDM systém (Product Data Management), jehož nedílnou součástí je také DNC. V tomto softwaru pak nejsou uloženy pouze NC programy a jejich starší verze, ale souhrn veškerých informací potřebných k výrobě požadovaného dílu. V takto založené struktuře je poté možno nalézt informace o artiklu, zákazníkovi, 3D modelu, výkresu, NC programu, upínací plán, seznam nástrojů včetně jejich detailních sestav a podsestav, seznam měřidel s měřicím plánem, ale také minimální a maximální čas obrábění, počet již vyrobených kusů, atd. Ukázka PDM systému je zobrazena na obr. 2.2. Na trhu existují i doplňkové moduly, které v kombinaci s PDM poskytují podporu při pokročilém plánování nebo vyhodnocování ukazatele OEE – efektivity strojního zařízení. [19] [18]



Obr. 2.2 Náhled na uživatelské rozhraní Cimco PDM v 6.0 [19].

## 2.2 CAD systémy

Počítačová podpora konstruování (CAD – Computer Aided Design) znamená použití počítačových systému k podpoře tvorby, modifikací, analýzy nebo optimalizace konstrukční činnosti za pomoci specifického softwarového vybavení [14]. CAD je pouze zlomkem z celé oblasti CAx technologií, zabývajících se nasazením mikroprocesorové výpočetní techniky do výrobního procesu. [20]

V tab. 2.1 je uvedeno základní rozdělení CAD systémů s jejich typickými představiteli a možnostmi uživatelského rozhraní. [21]



Tab. 2.1 Rozdělení CAx systémů.

Úroveň CAD systému	Rozhraní	Zástupci
nižší	2D, 3D jen omezeně	AutoCAD
střední	2D, 3D, CAM, CAE	Inventor SolidWorks SolidEdge VariCAD
vyšší	2D, 3D, CAM, CAE, PDM, PLM	Catia Siemens NX PTC Creo

Nižší CAD systémy disponují jednoduchým uživatelským rozhraním, které plně dostačuje pro tvorbu 2D objektů. Pracují na principu předdefinovaných hladin, pomocí kterých je zajištěno výstupní formátování výkresu. Tvorba výkresu není podmíněna přípravou 3D modelu, který sice lze v těchto CAD systémech vytvořit, jejich možnosti jsou však omezené. [21]

Střední třída CAD systémů plně podporuje tvorbu 3D modelu a následnou genezi 2D výkresu. Rozhraní modelu i výkresu jsou na sobě nezávislá. Některé střední CAD obsahují základní podporu CAM a CAE funkcí. [21]

CAD zařazené do vyšší třídy jsou založeny na prvotní přípravě 3D modelu a následné tvorbě 2D výkresu. Cílem tohoto softwaru je, aby veškeré rozměrové a geometrické informace uvedené na výkrese vycházely z 3D modelu. Touto podmínkou je zajištěno předávání relevantních informací do dalších modulů, jako jsou CAM, CAE, PDM a PLM.

CAD modely mohou být vytvořeny dvěma hlavními principy. Prvním je tvorba objemových modelů, označovaných také jako solid. Některé zdroje [21] řadí tento princip do hraniční reprezentace modelu. Charakteristické pro tyto modely je nutnost definice všech třech rozměrů.

Druhý princip je založen na modelování křivek a na ně navazujících ploch, tzv. curves a shapes. Tyto modely jsou tvořeny pouze obálkovou plochou reprezentující matematicky definovaný vnější tvar součásti, přičemž tloušťka plochy se limitně blíží nule. Své uplatnění tento princip nachází při modelování trupů letadel, lodí, karoserií vozidel a vláků.

Moduly CAD mohou používat pro zobrazení objektu grafiku založenou na kombinaci vektorů a matic nebo mohou provést tzv. rendering do rastrové grafiky. Vektorově založené modely je možné dále zpracovávat a převádět do univerzálních výměnných formátů, podporovaných CAM a CAE nadstavbovými moduly CAx systémů.

### 2.3 CAM jako podpora výroby

Zkratka CAM pochází z původních anglických slov Computer Aided Machining, tedy počítačem podporovaná výroba. Jedná se o numericky řízený programovací software generující G-kód a M-kód, ovládající NC a CNC stroje. CAM software je dnes již nedílnou součástí CAx technologií. Od začátku byl vyvíjen pro konkrétní výrobní technologii tak, aby byly při následném výrobním procesu dodrženy všechny nezbytné zvyklosti a podmínky, které si daná technologie vyžaduje. Takto získaný zdrojový kód je specifický dle druhu řídicího systému nebo požadavků zákazníka (např. CYCLE800 vs. L9+R31+A). [14] [22]

Vstupní informace v podobě 2D výkresu nebo 3D modelu jsou nahrány do prostředí CAM systému, kde jsou buď automaticky, nebo s podporou programátora zpracovány do podoby výstupního souboru. Nejvýrazněji proběhla automatizace v této oblasti u časově náročných operací, jako jsou např. hrubování a finišování forem, vrtací cykly, tvarové soustružení, apod. CAM softwary jsou pro tyto účely vybaveny předdefinovanými funkcemi a algoritmy, jež vznikly na základě mnohaletých zkušeností v tomto oboru. Existuje však mnoho dalších typů operací a aplikací, u kterých je automatizace obtížně proveditelná a je tedy nezbytné, aby bylo programování provedeno manuálně programátorem. [23] [24] [22]

Výstupem CAM systémů je jeden nebo více typů souborů v neutrálním jazyku, obsahující instrukce pro CNC stroje. Jsou to buď binární data nazývaná CLdata (nebo také CLfile) nebo čitelný ASCII formát přizpůsobený podle jazyku APT. Akronym APT vzniknul z původního anglického Automatically Programmed Tools – automaticky programovatelné nástroje. Jedná se o software, který akceptuje symbolickou geometrii, výrobní instrukce a generuje CLdata popisující výrobní operace v přesných příkazech. Některé CAM systémy zajišťují vysoký stupeň flexibility, takže je možné do neutrálních souborů doplňovat pomocí filtračních souborů další potřebné informace, nebo přizpůsobovat vzhled generovaného kódu firemním požadavkům. [25] Více o těchto funkcích je uvedeno v kapitole 2.5 Post processor.

Vrcholový management TPV se snaží najít prostory pro zlepšení i v této oblasti. Jedním z potenciálních a prosazovaných způsobů jak optimalizovat NC programy již v přípravné fázi je nasazení jiného vhodnějšího softwaru, specificky odladěného pro danou činnost. Lze tak dosáhnout nejen vyšších řezných rychlostí, ale také zkrácení přejezdových drah nástroje a jednotkových výrobních časů  $t_{AS}$ . V následujících podkapitolách jsou uvedeni zástupci CAM systémů využitelných pro obrábění tenkostěnných hliníkových tyčových polotovárů. [6]

### 2.3.1 EdgeCAM

Jeden z nejznámějších CAM softwarů, který je vyvíjen od samotného začátku jako CAM, je EdgeCAM od společnosti VeroSoftware. Lze tedy očekávat nejvyšší úroveň automatizace při vytváření jednotlivých sekvencí, intuitivní uživatelské rozhraní a kompatibilitu se všemi známými druhy softwarů. Jak je již v dnešní době zažitým standardem, software je koncipován do jednotlivých modulů zaměřených na danou technologii. [23]

EdgeCAM dnes nabízí kompletní softwarové CAM řešení nejen pro konvenční technologie, ale také například pro sondování nebo elektroerozivní drátové řezání. Zajímavým řešením je modul Solid obráběč, který načítá tzv. solid 3D modely v nativním formátu bez posunu nebo rotace dílu a funguje jako jakési prostředí pro úpravu a konverzi dat. S maximálním využitím původních dat lze automaticky rozpoznat jednotlivé konstrukční prvky, ke kterým je následně přiřazena obráběcí strategie, vztažená na aktuálně vybraný stroj a navržené upnutí. Vazby mezi vzniklými sekvencemi a modelem jsou plně asociativní, díky čemuž se po úpravě modelu změní také obráběcí strategie. [26]

Globálně lze říci, že v dnešní době již každý lepší CAM systém obsahuje automatizované sekvence jako například vrtání a závitování jedním kliknutím nebo kapsování. Tyto automatické prvky byly vytvořeny na základě předchozích zkušeností a jsou vhodné pouze pro jistý druh produktu – formy, zápusky, spojovací uzly hydraulické a pneumatické.

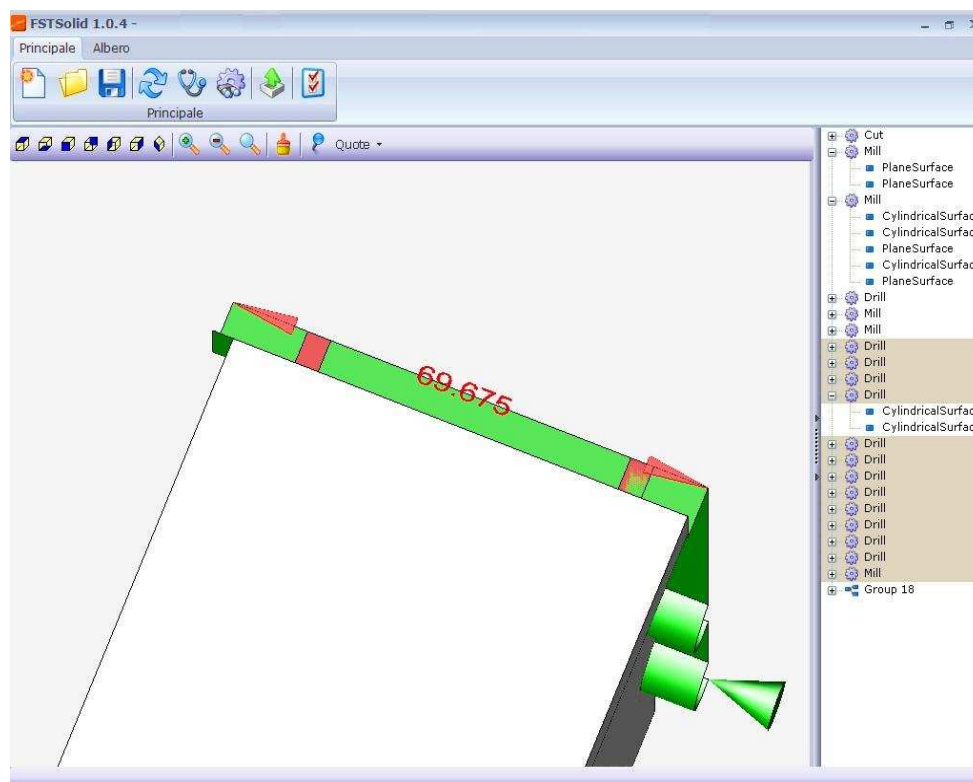
Při aplikaci těchto automatických prvků na obrobky v podobě extrudovaných tyčí z hliníkových slitin, se projeví reálné softwarové nedostatky, což snižuje úspěšnost navržených sekvencí pod 50%.

### 2.3.2 FSTSolid/FomCAM

Někteří výrobci obráběcích strojů investují nemalé finanční prostředky do vývoje vlastního CAD/CAM rozhraní. Jedním z takovýchto představitelů je například italská společnost FOMIndustrie (dále jen FOM) ze skupiny FOMGroup, se sídlem ve městě Catollica (RN).

Jejich stroje jsou řízeny pomocí rozhraní FSTSolid/FomCAM. Výhodou tohoto „nezávislého“ řízení je fakt, že tento software je vyvíjen přímo na míru potřebám společnosti FOM a je plně kompatibilní s jejich zařízeními.

Po importování 3D modelu ve formátu .STEP do uživatelského rozhraní programu FSTSolid, detekuje program automaticky výchozí tvar polotovaru (příčný průřez profilu). V případě komplikovanějších dílů je možné tento výchozí polotovaz manuálně doopravit. Podobným způsobem je definován nulový souřadný systém obrobku. Takto připravený polotovaz následně program porovná s vloženým modelem a v místech (řezech) kde nalezne přerušení homogenního průřezu profilu, se pokusí navrhnout vhodné obráběcí sekvence. Takto předem vytvořené sekvence je možné následně manuálně poupravit tak, aby byly například dodrženy vhodné řezné podmínky, souslednost frézování, nebo pořadí frézování jednotlivých vybrání (priorizace). Sekvence navržené v FSTSolid mají v porovnání s jinými softwary téměř 70% úspěšnost. Všechny, i manuální úpravy je nakonec možné nechat přepočítat tak, aby byl výrobní čas co nejkratší a obrábění probíhalo ve sledu jednoho směru (tedy zleva doprava nebo naopak). Při tomto přeuspořádání sekvencí jsou brány v potaz rychlosti výměny nástrojů, rychloposuvů a aktuálních pozic nástrojů. [27] Ukázka uživatelského rozhraní FSTSolid je zobrazena na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Náhled na prostředí FSTSolid se stromem technologických operací vpravo [27].

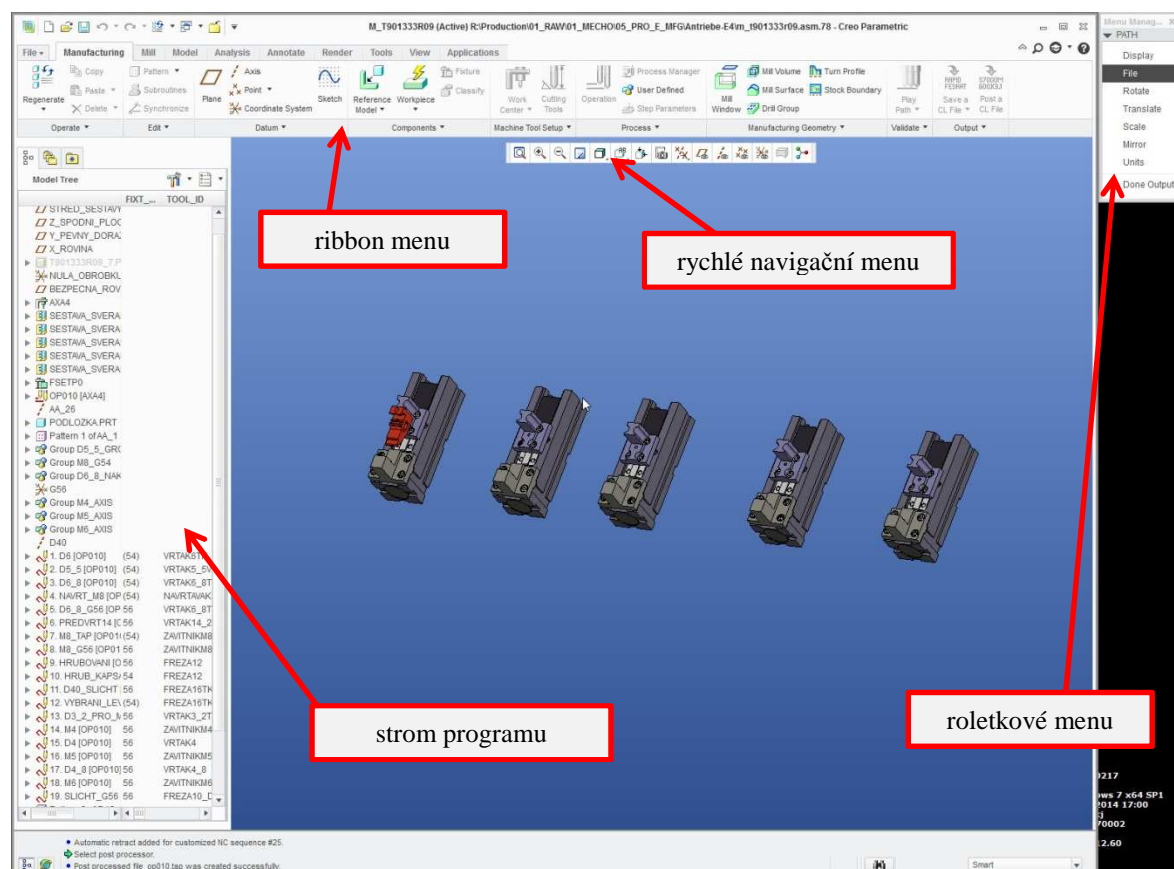
Z rozhraní FSTSolid je model převeden do prostředí FomCAM, kde se automaticky generují CNC programy vhodné pro spuštění na obráběcích centrech v módu jedné nebo dvou buněk. Vysoce realistické grafické rozhraní dovoluje generování extrémně přesných pohybů stroje. Automaticky propočítává optimální pozici svěráků, umístí obrobek přesně do stroje a zobrazí možnosti upnutí, které jsou k dispozici. [27]

Nevýhodou tohoto způsobu řízení je chybějící čitelný datový soubor instrukcí, který by bylo možno upravovat, sdílet nebo dále zpracovávat.

### 2.3.3 PTC ProEngineer/Creo

Společnost PTC patří mezi přední světové softwarové vývojáře 3D CAD softwaru a je jen málo známou skutečností, že jejich produkt – ProEngineer/Creo (dále jen Creo) obsahuje také pokročilé moduly na modelování plechových dílců, potrubí, moduly pro statickou a dynamickou analýzu a v neposlední řadě také modul pro obrábění. I přes to, že CAM modul Creo není stěžejním artiklem v rámci prodejní strategie PTC, lze tento software bez větších výhrad využít pro běžné i nestandardní úlohy.

Korporátním standardem ve společnosti IFE-CR, a.s. je právě PTC Creo. Výhodou CAM Crea je fakt, že je vytvořen na základu parametrického softwaru, který na straně jedné, uživatele svazuje a nutí jej dělat věci s matematickou přesností, na straně druhé, dává uživateli jedinečnou možnost vytvářet si vlastní nastavení, nástroje, sekvence a makra (mapkeys).



Obr. 2.4 Uživatelské rozhraní CAM Creo Parametric 2 [6].

Sekvence, které jsou například u EdgeCamu nebo FSTCAMu již předem naprogramovány, si zde uživatel může nastavit dle svých potřeb a zvyklostí.

Závitová díra tak může dle použité technologie být vytvořena třemi způsoby:

- 1) navrtání, vrtání, závitování,
- 2) vrtání kombinovaným vrtákem a závitování,
- 3) kombinované vrtání a závitování kombinovaným nástrojem vrták/závitník.

Tato modalita je výhodná především u atypických tenkostěnných dílců, u kterých nelze použít automatizované prvky.

Uživatelské rozhraní programu (obr. 2.4) je v nejnovější verzi Creo Parametric 2 přizpůsobeno posledním softwarovým konvencím, jako jsou menu ve formě ribbon lišty, zobrazení modelu včetně tmavých hran, rychlé navigační menu, upravená stromová oblast apod. Integrace ribbon menu však neproběhla ve 100% rozsahu, a proto je i zde možné se setkat s nešvarem v podobě roletkového menu u složitějších funkcí. Roletkové menu bylo výsadou především předchozích verzí. Orientace v nich je ale i přes tuto skutečnost rychlá a přesná, jde pouze o sílu zvyku.

Ukázka výstupního .NCL souboru, který je jedním z výstupů CAM systému Creo je uveden v příloze 5.

## 2.4 Řídicí systémy

Soubor softwarových a hardwarových prvků určených k řízení NC/CNC strojů se nazývají řídicí systémy (ŘS). Jedná se o pokročilé rozhraní HMI (Human Machine Interface), umožňující nejen předávání parametrických informací o obrobku stroji, ale v mnoha případech také čtení aktuálních informací o výrobním procesu. U moderních ŘS nahradily původní NC zpětnovazební řídicí obvody mikroprocesorová technika, princip však zůstal stejný. [14] V operační paměti je zaznamenán jeden blok NC programu, po jehož realizaci dojde k přepsání následujícího bloku příslušných dat v operační paměti novými příkazy. Do ŘS vstupují informace z ručně ovládaných prvků, jako jsou korekce nástroje, počátek souřadnicového systému, prodlevy, atd. U nejmodernějších HSM/HSC/HSF CNC strojů dokáže ŘS načítat a zpracovávat několik bloků dopředu. Je to dáno vysokými řeznými a posuvovými rychlostmi, které vyžadují velké zrychlení (zpomalení) na minimální dráze, aby nedošlo ke kolizi nebo tvarovým odchylkám obrobku.

### 2.4.1 Sinumerik

Společnost Siemens je jedním z nejvýznamnějších výrobců a vývojářů ŘS. Jejich produkt Sinumerik dostal svůj název již v roce 1964. Od roku 1996 jsou do systému přímo zabudovány bezpečnostní funkce, které byly o rok později doplněny uživatelsky orientovaným prostředím na straně stroje ShopTurn a ShopMill. Sinumerik je založen na platformě opcí, tzn. dle požadavku zákazníka jsou zpřístupněny potřebné funkce. Pokud zákazník vyžaduje rozšíření funkčnosti systému, nezbyvá než si danou opci dokoupit. K nejznámějším verzím ŘS Sinumerik patří:

**840C** – starší verze systému Sinumerik, spouštění podprogramů, skoky a čtení systémových proměnných probíhají pomocí příkazu @ a kódového označení činnosti

**840D** – jedna z posledních verzí ŘS Sinumerik se širokou oblastí nasazení, využívá příkazy standardního ISO-kódu v kombinaci s příkazy vyšších programovacích jazyků

## 2.5 ISO kód (G-kód, M-kód)

G-kód a M-kód je název pro programovací jazyk, který je používán k řízení NC a CNC obráběcích strojů. Byl vyvinut společnostmi zabývajícími se vytvářením standardů – EIA (Electronics Industry Association) a ISO (International Organization for Standardization) na počátku šedesátých let. Jeho konečná verze byla schválena v únoru 1980 jako RS274D. [28]

Zápis řídicího kódu je formován do podoby strukturovaného NC programu, který je možné definovat na čtyři hlavní oblasti [29]:

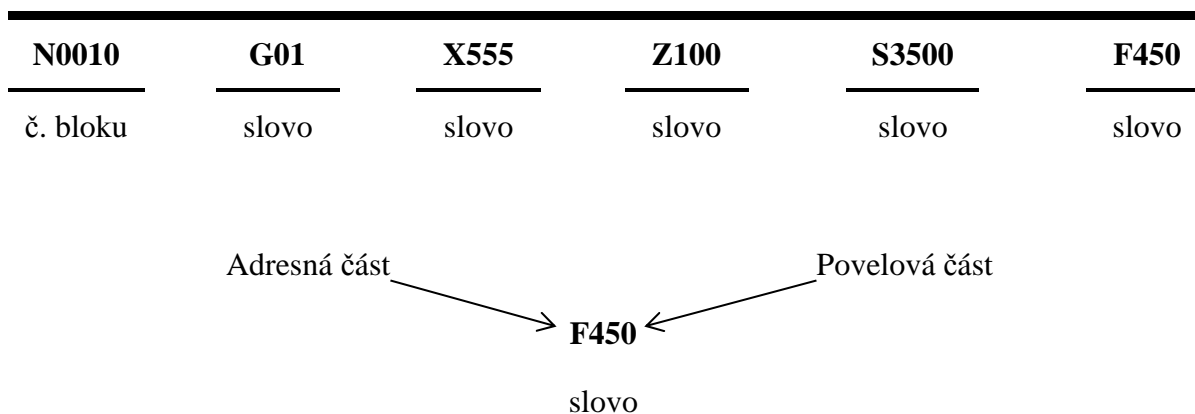
- 1) úvodní část                    %MPF1000; %SPF0001,
- 2) přípravná část                technologické údaje,
- 3) obsahová část                geometrie drah nástroje,
- 4) závěrečná část               M30; M17.

Úvodní oblast obsahuje název programu, číslo, pod kterým je zpravidla uložen i v archivu stroje. V dalších blocích jsou ve formě komentáře uloženy doplňující informace o datu pořízení programu, autorovi, projektu, zákazníkovi, číslu artiklu obrobku a například reálném obráběcím čase.

V přípravné části následují informace o nastavení nulového bodu obrobku, nástroje a jeho korekce, nastavením řezných podmínek a roztočením vřetene. Hlavní obsah programu tvoří vlastní popis geometrie drah jednotlivých řezů při obrábění součástí. [29]

Každý NC program je složen z bloků neboli vět. Věty jsou složeny ze slov a slova jsou složena s adresné a významové části (viz obr. 2.5). [14]

### BLOK



Obr. 2.5 Schéma struktury programového slova [14].

NC program je definován formátem, tzv. smluvním zápisem struktury a rozložení slov v bloku s maximálním počtem slov. [14]

Aby struktura bloku zůstala co možná nejpřehlednější, měly by být příkazy v bloku uspořádány v následující posloupnosti [30]:

N... G... X... Y... Z... F... S... T... D... M... H...

### 2.5.1 Adresové znaky funkce programu

Základní sada adresových funkcí dle ISO 646 je uvedena v tab. 2.2. Ve strojírenské praxi je často možné se setkat s různým zápisem řídicího kódu, což je dáno vývojářem ŘS. [31]

Tab. 2.2 Adresové znaky a jejich význam [31] [14] [30].

Znak	Význam
A	úhlový rozměr kolem osy X
B	úhlový rozměr kolem osy Y
C	úhlový rozměr kolem osy Z
D	úhlový rozměr kolem speciální osy nebo posuvové funkce, nebo funkce pro volbu korekce nástroje
E	úhlový rozměr kolem speciální osy nebo druhá posuvová funkce
F	posuvová funkce
G	přípravná funkce
H	neurčeno, používá se ke specifikaci čísla korekčního nástroje
I	interpolační parametr nebo stoupání závitu rovnoběžně s X
J	interpolační parametr nebo stoupání závitu rovnoběžně s Y
K	interpolační parametr nebo stoupání závitu rovnoběžně s Z
L	neurčeno
M	pomocná funkce
N	číslo bloku
O	neurčeno
P	rozměr terciálního pohybu rovnoběžně s X nebo parametr korekce nástroje
Q	rozměr rovnoběžný s Y nebo parametr korekce nástroje
R	rozměr rychloposuvu rovnoběžně se Z nebo rozměr terciálního pohybu rovnoběžně se Z nebo parametr korekce nástroje
S	otáčková funkce vřetene
T	nástrojová funkce
U	rozměr sekundárního pohybu rovnoběžný s X
V	rozměr sekundárního pohybu rovnoběžný s Y
W	rozměr sekundárního pohybu rovnoběžný s Z
X	rozměr primárního pohybu v ose X
Y	rozměr primárního pohybu v ose Y
Z	rozměr primárního pohybu v ose Z

### 2.5.2 Přípravné funkce

V tab. 2.3 jsou uvedeny nejvýznamnější přípravné funkce systému Sinumerik 840C včetně jejich významu. Ve specifických případech jsou přípravné funkce tvořeny podprogramy se vstupními proměnnými, vycházejícími ze základních adresových znaků.

Tab. 2.3 Specifikace přípravných funkcí Sinumerik 840C [30].

Funkce	Parametr funkce	Popis funkce
G0	X, Y, Z	rychlý posuv
G1	X, Y, Z, F	lineární interpolace
G2	X, Y, Z, I, J, K	kruhová interpolace CW
G3	X, Y, Z, I, J, K	kruhová interpolace CCW
G4	X	časová prodleva příkaz G4 X30 - prodleva 30 sekund
G17 až G19		volba roviny XY, YZ, ZX dostupné u frézování
G40		zrušení korekce poloměru nástroje
G41		korekce nástroje odsazení od kontury vlevo
G42		korekce nástroje odsazení od kontury vpravo
G53		zrušení korekčních hodnot WCS
G54		souřadnice WCS pro první polohu obrobku
G55		souřadnice WCS pro druhou polohu obrobku
G56		souřadnice WCS pro třetí polohu obrobku
G57		souřadnice WCS pro čtvrtou polohu obrobku
G64		funkce pro udržení konstantní rychlosti při změně velikosti opásání nástroje
G80		zrušení konstantního cyklu
G81 až G89		konstantní cykly
G90		programování v absolutních rozměrech
G91		programování v inkrementech
G94		posuv v mm.min <sup>-1</sup>
M0		programovatelné zastavení, čeká na akci obsluhy
M3	S	vřeteno se otáčí doprava (CW)
M4	S	vřeteno se otáčí doleva (CCW)
M5		zastavení vřetena
M6	X, Y, Z, T	výměna nástroje (standardní nastavení)
M8		zapnutí chlazení
M9		vypnutí chlazení
M17		konec podprogramu
M30		konec programu

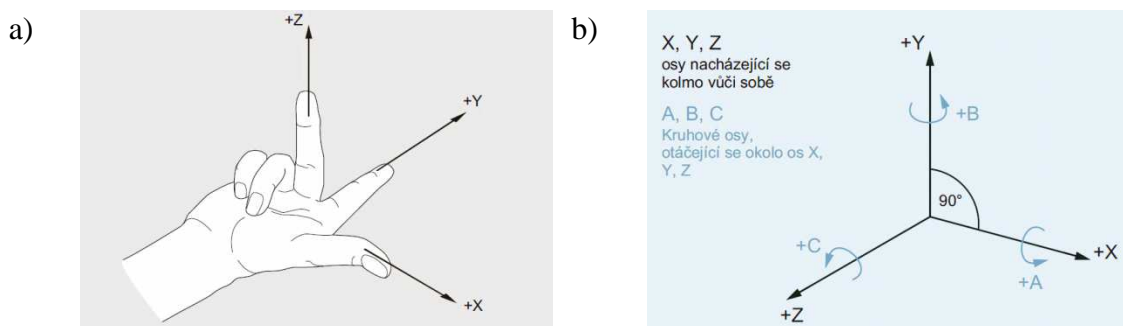
## 2.6 Geometrické základy

Aby stroj, případně řídicí systém mohl pracovat s pozicemi a příkazy zadanými v NC programu, musí být dodrženy základní programovací a geometrická pravidla.

### 2.6.1 Souřadné systémy

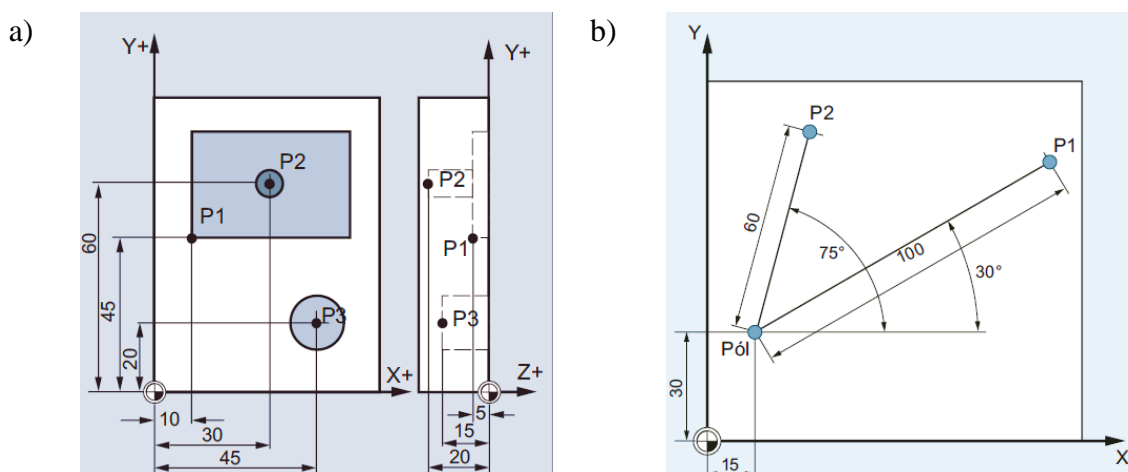
Dle normy DIN 66217 se pro obráběcí stroje používá kartézský (pravoúhlý, pravotočivý) souřadný systém (viz obr. 2.6 b). Tato norma také definuje tzv. pravidlo pravé ruky, pomocí kterého lze odvodit další souřadné systémy. Podle tohoto pravidla platí, že palec ukazuje směr osy +X, ukazováček míří ve směru osy +Y a prostředníček je ve směru osy +Z (viz obr. 2.6 a).





Obr. 2.6 a) pravidlo pravé ruky podle DIN 66217 [30], b) kartézský souřadný systém [30].

Jednotlivým osám v souřadném systému jsou přiřazeny rozměrové jednotky, díky čemuž může být každý bod v souřadném systému nebo na obrobku jednoznačně popsán směrem a číselnou hodnotou. Další variantou pro popis polohy bodu jsou tzv. polární souřadnice - kombinace úhlové míry a absolutní vzdálenosti od referenčního pólu (viz obr. 2.7 b). [30]



Obr. 2.7 a) kótování absolutních souřadnic [30], b) kótování polárních souřadnic [30].

Číselné hodnoty souřadnic lze zadávat buď v absolutních hodnotách vztažených k jednomu souřadnému systému (viz obr. 2.7 a), nebo inkrementálně – přírůstkem hodnoty ve směru dané osy od předchozího bodu. [30]

Při obrábění je možné rozlišovat několik typů souřadných systémů a vztažných bodů. Jejich význam a grafické značení je uvedeno v tab. 2.7.








### 2.6.2 Korekce nástroje

Do NC programu jsou přímo zadávány rozměry obrobku na základě výkresových hodnot. Zadané hodnoty mohou akceptovat reálné rozměry nástroje, v tomto případě však nelze nástroj zaměnit.

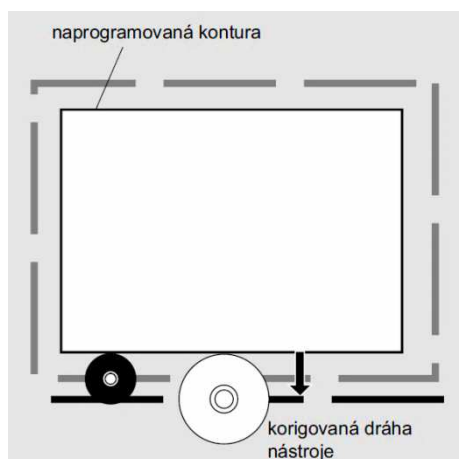
Druhou možností je zápis hodnot dle výkresu s využitím korekčních nástrojových registrů (obr. 2.8 b). Nástroj se poté pohybuje po korigované dráze nástroje. Tuto dráhu (obr. 2.8 a) popisuje [30]:

„Střed frézy, příp. střed břitu se musí pohybovat po ekvidistantní dráze vedle kontury. Za tím účelem potřebuje řídicí systém údaje o tvaru nástroje (rádius, délka).“

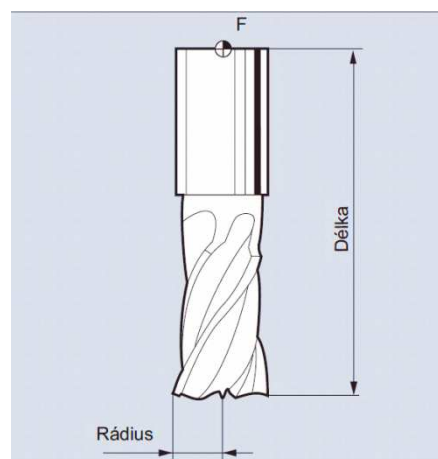
Tab. 2.7 Souřadné systémy a vztažné body využitelné při programování stroje [30].

Grafická značka	Označení	Zkratka	Popis
	M	MCS	počátek souřadného systému stroje, vůči tomuto souřadnému systému jsou vztaženy všechny ostatní souřadné systémy a vztažné body
	W	WCS	počátek souřadného systému obrobku, výchozí bod programu, definován osovými vektory posunutí vůči MCS
	A		doraz, využíváno pro soustruhy
	R		referenční bod, najetí nástroje po startu programu
	B		počáteční bod, může být definován programem, zde začíná pohyb 1. nástroje při obrábění
	T		vztažný bod držáku nástroje
	N		bod pro výměnu nástroje

a)



b)

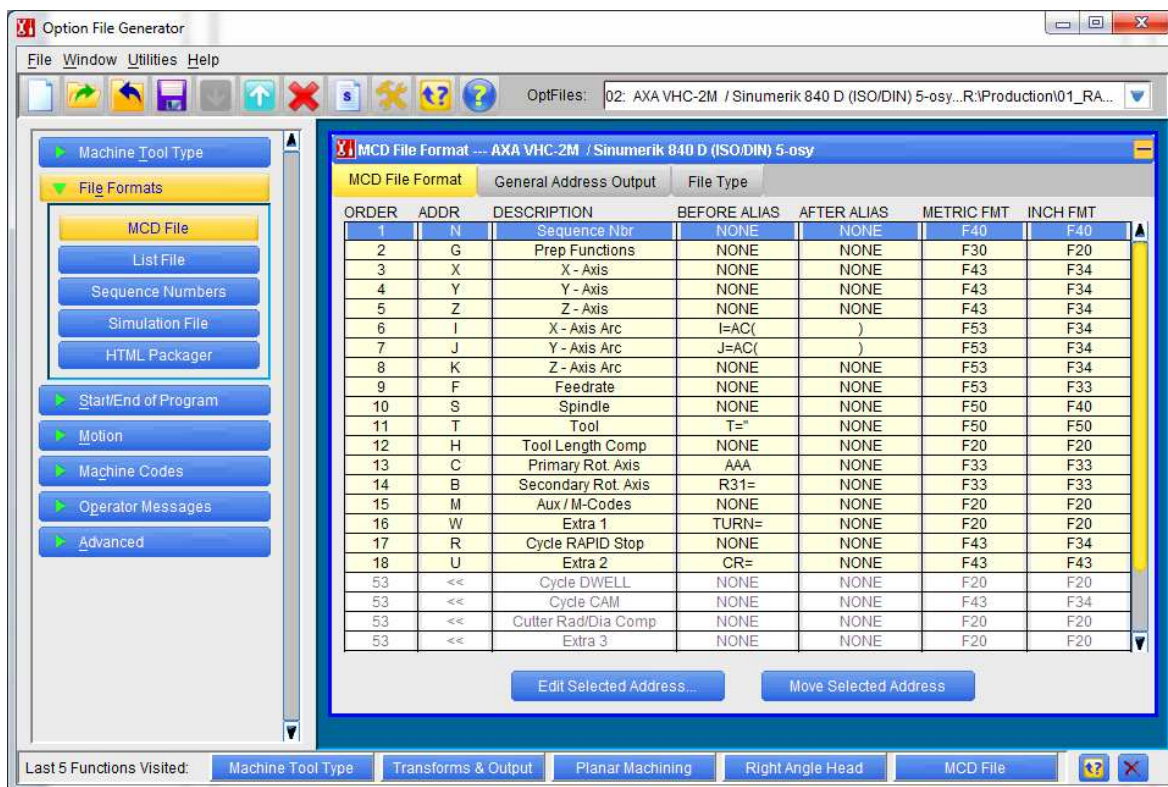


Obr. 2.8 a) korigovaná dráha nástroje [30], b) korekční parametry nástroje [30].

## 2.7 Post processor

Jedná se o software zodpovědný za překlad neutrálních instrukcí z CAM systému do specifických instrukcí požadovaných CNC strojem. Post procesor vytváří několik souborů, když zpracovává vstupní CL data z CAM systému. Jako první vytvoří soubor MCD, také známý jako soubor punch (.PU1 nebo .TAP) a soubor výpisu (.LST). Doplnující soubory nastavení mohou být konfigurovány do podoby HTML souboru (.HTM) a souboru simulace (.TAB). Volitelně lze při konverzi použít soubory FIL k dalšímu zhodnocení

výstupních MCD souborů. V závěru dojde k vytvoření kopie MCD souboru a přiřazení přípony, kterou umí CNC stroj zpracovat (.NC; .MPF; .SPF apod.). Obecný post procesor (dále jen OPP) pro soustruhy bývá označován UNCL01. Pro frézovací stroje, elektroerozivní a laserové stroje bývá označován UNCX01. [25] [32] Princip post procesingu je zobrazen na obr. 2.10.



Obr. 2.9 Uživatelské rozhraní generátoru souboru nastavení.

### 2.7.1 Možnosti úpravy post procesoru

Existují tři možnosti úpravy OPP pro jednotlivé řídicí jednotky strojů:

#### *Soubor nastavení*

Generátor souboru nastavení (obr. 2.9) je aplikace, použitá k vytvoření nebo úpravě souboru nastavení, který je použit ke konfiguraci výstupu z post procesoru dle uživatelských specifikací. Soubor nastavení je čten OPP v čase spuštění a mění post procesorovou tabulku priorit interních proměnných ke čtení nástrojových drah nebo CL souboru. Soubory nastavení mají stejný název jako OPP, tedy UNCL01 nebo UNCX01, rozlišeny jsou pomocí přípony .Pnn, kde nn je přiřazené číslo stroje. [32] Ukázka části souboru UNCX01.Pnn je uvedena v příloze 1.

#### *Soubor FIL*

Jedná se o textový soubor maker, který je použit k úpravě výstupních dat z post procesoru. Díky tomuto souboru jsou do výsledného NC programu umístěny například informace o autorovi, projektu, datu pořízení programu, strukturovaná tabulka nástrojů, komentáře sekvencí apod. Soubory FIL jsou rozlišeny příponami .Fnn, kde nn je přiřazené číslo stroje. [32]

### PLABEL

Pro malé změny je možné použít příkaz PLABEL v CL souboru k přepsání výchozích hodnot. Ačkoliv je v dnešní době řazen do kategorie nevyužívaných příkazů, stále je plně podporován. [32]

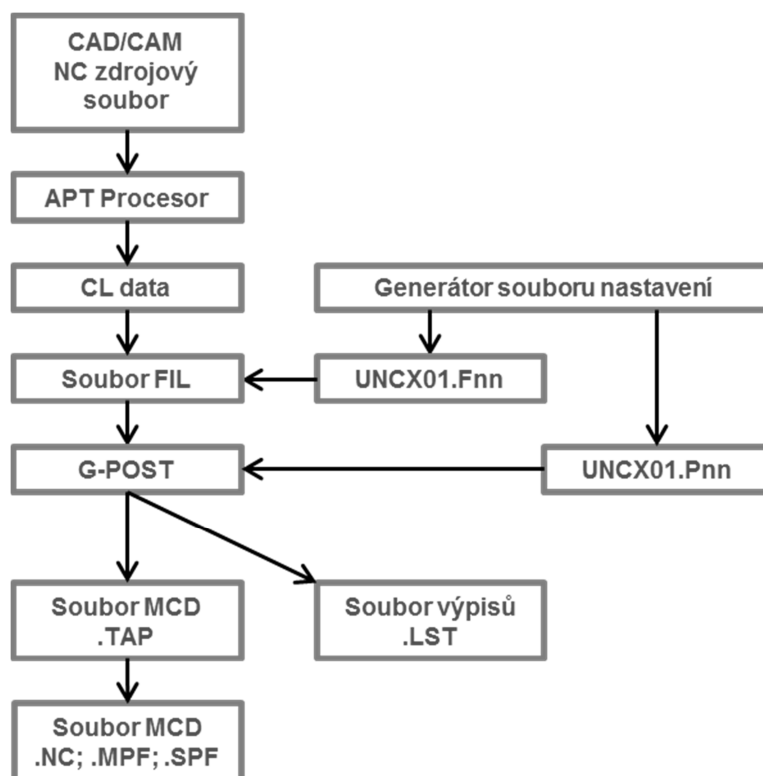
### 2.7.2 Výstupní soubory

*Soubor MCD (.PUI nebo .TAP)*

Obsahuje specifické informace potřebné pro stroj k obrobení dílu definovanými pohyby nástroje. Tento výstup je založen na vybraném souboru nastavení a přidáných úpravách zpracovaných FIL souborem. [32]

*Soubory výpisu (.LST)*

Jedná se o ověřovací soubor vytvořený OPP obsahující detailní informace, jako jsou polohy os, nástrojový list, varovná hlášení, cyklové časy apod. Tato data jsou formátovanou verzí dat MCD souboru. [32] Ukázka .LST souboru je uvedena v příloze 6.



Obr. 2.10 Schéma post procesingu.

### 2.8 Příprava NC programu ve společnosti IFE-CR, a.s.

V současné době je ve společnosti IFE-CR, a.s. pro konstrukční činnost a tvorbu programu využíván jediný korporátně schválený nástroj – CAD/CAM systém Creo Parametric 2. Pro sdílení CAD modelů je využíváno síťového rozhraní PLM nástavby systému – Windchill (dříve Intralink). Z těchto modelů jsou následně programátory vytvořeny CAM sestavy na základě kterých probíhá také generování NC kódů. Vzhledem k rozšířené problematice

změnových indexů dílů a CAM sestav, bylo nakonec přistoupeno k ponechání CAM sestav a šablon po jejich vytvoření na lokálních serverových úložištích. [6]

Standardní proces technologické přípravy výroby začíná stažením uvolněného 3D modelu a vytvořením obráběcí sestavy, vycházející z předdefinovaných šablon. Model profilu je ustaven do konfigurace svěráků tak, aby bylo možno tento profil obrobit na jediné upnutí. Následně je opatřen základními souřadnými systémy (CSYS) a jejich bezpečnostními rovinami (RETRACT). Takto vytvořený model je možné osadit obráběcími sekvencemi - jednotlivými kroky nezbytnými pro zhotovení obrobku. Vstupní parametry pro sekvence se liší v závislosti na typu dané činnosti, společné jsou však zadání CSYS a RETRACTu.

U vrtacích sekvencí stačí pouze vybrat otvory rovnoběžné s osou Z zadaného souřadného systému a CAM vybere všechny otvory se stejným průměrem a směrovým vektorem. Po doplnění řezných podmínek a úpravy bezpečné přejezdové hladiny nad obrobkem je sekvence hotova.

U frézovacích sekvencí je možné využít předdefinovaných typů, nicméně vzhledem k charakteru polotovaru a obrobku je nejvhodnější definovat dráhy nástroje ručně. Ty mohou být definovány v různých výškových hladinách nebo přímo na plochách obrobku. K dalším volbám této sekvence patří odsazení nástroje od kontury nebo středem nástroje, prodloužení dráhy nástroje a eventuální nájezdy na korekci.

Po vytvoření souboru všech sekvencí (operace) potřebných k obrobení polotovaru následuje vytvoření .NCL souboru obsahující CL data a post procesing zakončený genezí NC programu. Ten je dále využíván a archivován skrze DNC systém.

Paralelně k této činnosti je vytvořen také výkres upnutí sestavy (upínací plán). Po vytvoření NC programu je tento plán vtištěn a předán na pracoviště.

Průměrná doba přípravy NC programu je závislá na typu profilu a jeho náročnosti (typu dveří). Pro QP se potřebný čas pohybuje mezi 3 - 6 hodinami, u LP je tento rozsah 3 - 8 hodin. Existují však i výjimky, při kterých si příprava NC programu vyžaduje více než 15 hodin.

## 2.9 Analýza stávajícího NC programu

Pro analýzu byl zvolen typický představitel produktového portfolia, horní profil sendvičového dveřního křídla. Výkres součásti je uveden v příloze 9.

Kompletní původní NC program pro řídicí systém Sinumerik 840C, opatřený komentáři k jednotlivým sekvencím je uveden v příloze 10. Analýzou tohoto programu byly zjištěny následující oblasti vhodné k optimalizaci:

- nejsou jasně definovány řezné rychlosti, při tvorbě programu je udělán pouze prvotní „náštel“, řezné podmínky jsou poddimenzovány,
- generovaný NC program je nutné ručně doopravit tak, aby obsahoval správnou nástrojovou tabulku včetně korekcí nástrojů,
- v některých případech jsou opomenuty operace navrtání závitových otvorů,
- upínací plán související s NC programem má nepřehlednou strukturu a velmi špatnou vypovídající hodnotu,

- zavádění rozsáhlejší změn či náročných prototypů do výroby může přesáhnout několik dní.

Pro výše uvedené body jsou v kapitolách 3 a 4 navržena optimalizační opatření.

### 3 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Pojem optimalizace všeobecně označuje proces výběru nejlepší varianty z množství možných jevů. Nejlepší variantou lze označit ten jev, který přináší maximální užitnou hodnotu s vynaložením minima zdrojů. Optimální jev nemusí být pouze jeden, ale může se jednat o celý soubor vzájemně odlišných jevů. Strojírenská technologie se nejčastěji zabývá optimalizací výrobních nákladů, výrobního času a řezných podmínek.

#### 3.1 Optimalizace výrobních nákladů a časů

Výrobní čas a s tím spojené náklady lze optimalizovat z hlediska optimální řezné rychlosti nebo optimální trvanlivosti nástroje. Úlohy tohoto typu jsou zjednodušeny do reprezentativního modelu obrábění jedné plochy obrobku jedním nástrojem. Celkové operační náklady na 1 kus  $N_c$  se vyjádří podle [15] jako součet dílčích položek, viz rovnice (3.1).

$$N_c = N_s + N_n + N_v \quad (3.1)$$

kde:  $N_s$  [Kč] - náklady na strojní práci,  
 $N_n$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na 1 obrobek,  
 $N_v$  [Kč] - náklady na vedlejší práci.

Po dosazení všech dílčích vztahů pro výpočet jednotlivých složek do (3.1) dostáváme podle [15] výslednou rovnici (3.2) pro operaci soustružení.

$$N_c = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_T \cdot \tau + t_{AV} \cdot N_{Vm} \quad (3.2)$$

kde:  $L$  [mm] - soustružená dráha,  
 $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky obrobku,  
 $f$  [mm] - posuv,  
 $T$  [min] - trvanlivost,  
 $N_{sm}$  [Kč. $\text{min}^{-1}$ ] - minutová sazba stroje,  
 $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu na trvanlivost bříty,  
 $t_{AV}$  [min] - jednotkový vedlejší čas,  
 $N_{Vm}$  [Kč. $\text{min}^{-1}$ ] - minutová sazba na vedlejší práci.

#### 3.1.1 Optimální řezná rychlost

Při hledání optimální řezné rychlosti vychází [15] ze základního Taylorova vztahu, který dosadí do rovnice celkových operačních nákladů (3.1). Po vyšetření minima dané funkce definuje [15] vztah (3.3) pro hodnotu optimální řezné rychlosti podle kritéria optimálních výrobních nákladů.

$$v_{c \text{ opt}} = \left( \frac{k_1}{k_2 \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} = \left( \frac{c_T}{\tau} \cdot \frac{N_{sm}}{N_T \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.3)$$

kde:  $v_{\text{copt}}$  [m.min<sup>-1</sup>] - optimální řezná rychlost,  
 $N_{\text{sm}}$  [Kč.min<sup>-1</sup>] - minutová sazba stroje,  
 $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu na trvanlivost bříty,  
 $m$  [-] - exponent,  
 $c_T$  [-] - konstanta,  
 $\tau$  [-] - koeficient čistého času řezu.

### 3.1.2 Optimální trvanlivost bříty

Obecně závisí trvanlivost bříty na řezných podmínkách, k určení konkrétní trvanlivost a s tím spojených nákladů je možné dané případy posuzovat ze dvou různých hledisek:

#### Kritérium minimálních výrobních nákladů

Celkové operační výrobní náklady jsou vyjádřeny vztahem (3.1), které se v rámci daného úkolu vyjádří v upraveném tvaru (3.4) [14]:

$$N_c = f(T) = K_{TN1} \cdot T^{\frac{1}{m}} + N_{nv} + N_T \cdot K_{TN2} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} \quad (3.4)$$

kde:  $T$  [min] - trvanlivost,  
 $m$  [-] - exponent,  
 $N_{nv}$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu,  
 $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažení na jednu trvanlivost,  
 $K_{TN1}$  [-] - konstanta vyjádřená pro specifický druh činnosti, např. soustružení,  
 $K_{TN2}$  [-] - konstanta vyjádřená pro specifický druh činnosti, např. soustružení.

Minimum funkce (3.5) stanoví [14] pro podmínku vyjádřenou (3.4):

$$dN_c/dT = K_{TN1} \cdot m^{-1} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} + N_T \cdot K_{TN2} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot T^{\frac{1}{m}-2} = 0 \quad (3.5)$$

Z čehož lze vyjádřit optimální trvanlivost pro kritérium minimálních operačních výrobních nákladů (3.6) podle [14].

$$T_{\text{optN}} = \frac{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T}{N_{\text{sm}}} \quad (3.6)$$

přičemž:  $T_{\text{optN}}$  [min] - optimální trvanlivost  
 $m$  [-] - exponent,  
 $\tau$  [-] - koeficient čistého času řezání  
 $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu na jednu trvanlivost,  
 $N_{\text{sm}}$  [Kč.min<sup>-1</sup>] - minutová sazba stroje.



**Kritérium maximální výrobnosti**

Výrobnost dosahuje lokálního maxima ve chvíli, kdy je operační čas jednotkové práce minimální. Ten je v daném případě definován vztahem (3.7) jako součet základních složek podle [14]:

$$t_A = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (3.7)$$

kde:  $t_A$  [min] - operační čas jednotkové práce,  
 $t_{AS}$  [min] - jednotkový strojní čas,  
 $t_{AV}$  [min] - jednotkový vedlejší čas,  
 $t_{AX}$  [min] - čas jednotkové nepravidelné obsluhy,  
 $Q_T$  [-] - počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje.

Pro stanovení minima funkce (3.9) je potřeba vyjádřit  $t_A$  ve tvaru (3.8) podle [14], přičemž konstanta  $K_{TV}$  je definována v závislosti na parametrech obrábění a druhu činnosti

$$t_A = f(T) = K_{TV} \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_{AV} + K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} \quad (3.8)$$

$$dt_A/dT = \frac{1}{m} \cdot K_{TV} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} + \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\frac{1}{m}-2} = 0 \quad (3.9)$$

kde:  $t_A$  [min] - operační čas jednotkové práce,  
 $T$  [min] - trvanlivost,  
 $m$  [-] - exponent,  
 $t_{AV}$  [min] - jednotkový vedlejší čas,  
 $t_{AX}$  [min] - čas jednotkové nepravidelné obsluhy,  
 $K_{TV}$  [-] - konstanta závislá na parametrech obrábění.

Odtud lze po úpravě vyjádřit optimální trvanlivost pro kritérium maximální výrobnosti jako (3.10) podle [14]:

$$T_{optV} = (m - 1) \cdot \tau \cdot t_{AX} \quad (3.10)$$

přičemž:  $T_{optV}$  [min] - optimální trvanlivost  
 $m$  [-] - exponent,  
 $\tau$  [-] - koeficient čistého času řezání,  
 $t_{AX}$  [min] - čas jednotkové nepravidelné obsluhy.

**3.1.3 Trvanlivost břitu nástroje**

Definice trvanlivosti podle [14]:

*„Je to doba, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit požadované funkce, které jsou identifikovatelné příslušnými parametry. Trvanlivost nástroje je tedy určena intervalem*

mezi nasazením nástroje do řezného procesu a vznikem poruchy, kterou končí provozuschopný stav stroje.“

Z hlediska predikce není prakticky možné předpovědět tzv. poruchy náhlé, kdy dojde k prudké změně některého z parametrů (např. poškození břitu, destrukce nástroje). Naproti tomu poruchy postupné je možné relativně dobře předpovídat pomocí tzv. kvantifikátorů opotřebení, které je možné měřit a sledovat. K nejdůležitějším parametrům patří opotřebení hřbetu VB, hloubka žlábků opotřebení čela KT, radiální opotřebení špičky VR a šířka žlábků opotřebení čela KB.

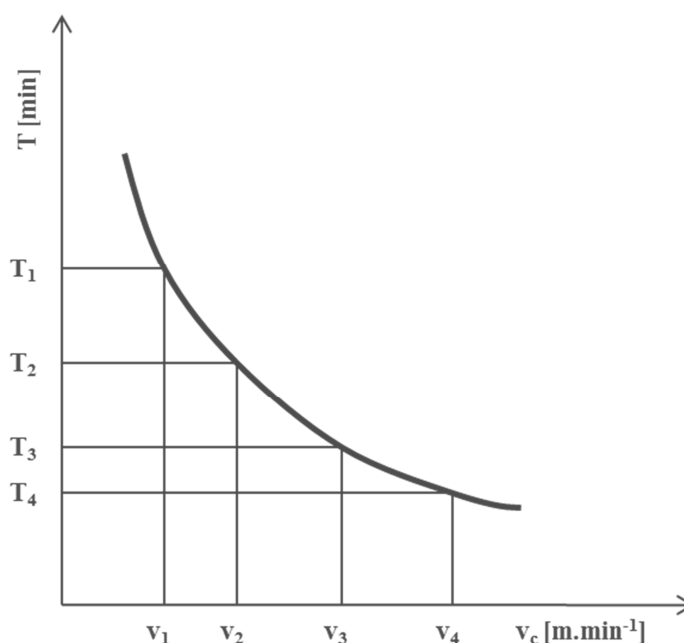
Trvanlivost břitu je obecně závislá na řezné rychlosti. Pro jinak konstantní podmínky ji pak lze definovat matematicky pomocí Taylorova vztahu, v některých zdrojích [15] uváděný jako „T -  $v_c$  závislost“, která je popsána základními vztahy (3.11), (3.12) a (3.13). Průběh vztahu (3.2) v lineárních souřadnicích je zobrazen na obr. 3.1.

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} \quad (3.11)$$

$$v_c = f(T) = C_v \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad (3.12)$$

$$C_v = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (3.13)$$

kde: T [min] - trvanlivost břitu,  
 $C_T$  [-] - konstanta, hodnoty  $10^8$  až  $10^{12}$  dle materiálu obrobku a nástroje,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 m [-] - exponent,  
 $C_v$  [-] - konstanta.



Obr. 3.1 Průběh závislosti  $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ .

Závislost  $v_c$  na šířce záběru ostří  $a_p$  a posuvu  $f$  se známou trvanlivostí bříty  $T$  je možné vyjádřit tzv. komplexním Taylorovým vztahem (3.14), pokud jsou ostatní podmínky konstantní. [15]

$$v_c = f(a_p, f, T) = C_{vT} \cdot T^{\frac{-1}{m}} \cdot a_p^{-x_v} \cdot f^{-y_v} \quad (3.14)$$

přičemž:	$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	- řezná rychlost,
	$a_p$	[mm]	- šířka záběru ostří,
	$f$	[mm]	- posuv,
	$x_v$	[-]	- exponent,
	$y_v$	[-]	- exponent,
	$m$	[-]	- exponent,
	$C_{vT}$	[-]	- konstanta.

Kde  $C_{vT}$  a  $x_v$ ,  $y_v$  jsou stanoveny empiricky pro jednotlivé kombinace materiálu obrobku a nástroje. [14]

### 3.2 Obrobitelnost hliníkových slitin

Pojem obrobitelnost charakterizuje celkový dopad fyzikálních vlastností, chemického složení a okolních vlivů na ekonomicko-provozní výsledky řezného procesu a určuje tak vhodnost daného materiálu k obrábění. Obrobitelnost závisí na mnoha vstupních faktorech, a z tohoto důvodu nebyl doposud odvozen žádný exaktní vztah, pomocí kterého by bylo možno stupeň obrobitelnosti vypočítat. [8]

Mezi hlavní faktory patří:

- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- způsob výroby a tepelné zpracování polotovaru,
- metoda obrábění,
- řezné podmínky a prostředí,
- geometrie nástroje.

U hliníkových slitin závisí stupeň obrobitelnosti na jejich chemickém složení, způsobu zpracování polotovaru a také tepelném zpracování. Nejvýhodnějšími legujícími prvky, které zvyšují obrobitelnost hliníku, jsou ty, které s ním vytváří měkké sloučeniny ( $Mg_2Al_3$ ,  $TiAl_3$ ) a eutektika. Mezi ně patří například měď, hořčík, mangan, zinek, chróm, vizmut. Křemík na druhou stranu obrobitelnost snižuje.

Technické konstrukční materiály jsou pro potřeby vyhodnocování obrobitelnosti rozříděny do devíti základních skupin dle CNN (Celostátní normy a normativy), označovanými malými písmeny (viz tab. 3.1). [15]

Tab. 3.1 Materiálové skupiny dle CNN [15].

Označení	Materiálová skupina
a	litiny
b	oceli
c	těžké neželezné kovy, měď, a slitiny mědi
d	lehké neželezné kovy, hliník a slitiny hliníku
e	plastické hmoty
f	přírodní nerostné hmoty
g	vrstvené hmoty
h	pryže
v	tvrzené litiny pro výrobu válců

V každé skupině je stanoven konkrétní materiál, sloužící jako etalon, vůči kterému se poté posuzuje relativní obrobiteľnost. Definice součinitele obrobiteľnosti (3.15) podle [14]:

$$K_v = \frac{v_{CT/VB} \text{ vzorku}}{v_{CT/VB} \text{ etalonu}} \quad (3.15)$$

kde:  $v_{CT/VB}$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost při trvanlivosti T pro opotřebení VB.

Značení tříd je prováděno číslem umístěným před písmeno určující danou skupinu materiálů (např. 16b, 10d, 12a, apod.). Třída je charakterizována vlastní hodnotou součinitele obrobiteľnosti, jehož odstupňování je dáno geometrickou řadou kvocientu. Pro ocel je podle metodiky CNN hodnota kvocientu stanovena na  $q = 10^{\frac{1}{10}} = 1,26$ . Třídy označeny nižším číslem než má třída etalonu, mají v porovnání s ním horší obrobiteľnost, naproti tomu materiály v třídách s vyšším číslem mají obrobiteľnost lepší (viz tab. 3.2). Součinitel obrobiteľnost etalonu je  $K_v = 1$ . [15] [14]

Tab. 3.2 Výběr nejběžnějších tříd obrobiteľnosti [14].

Střední hodnota $K_v$	Třída obrobiteľnosti pro skupinu materiálů			
	a	b	c	d
0,50	7a	11b	8c	7d
0,63	8a	12b	9c	8d
0,80	9a	13b	10c	9d
1,00	10a	14b	11c	10d
1,26	11a	15b	12c	11d
1,59	12a	16b	13c	12d
2,00	13a	17b	14c	13d

Skupina obrobiteľnosti hliníkových slitin AlMgSi1Mn [33], konkrétně EN-AW-6082 pro operace vrtání a frézování je stanovena dle normativu na 12d. V porovnání s etalonovým materiálem ( $K_v = 1$ ), který má definovanou třídu obrobiteľnosti 10d je patrné, že výše uvedený konstrukční materiál je možné lépe obrábět. [34] [35]

### 3.3 Obrábění lisovaných profilů

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, lze slitiny hliníku relativně lehce obrábět. Z tohoto důvodu jsou v dnešní době na tyto polotovary pořizovány vysokorychlostní stroje (tzv. HSM, HSC, HSF).

Obrábění lisovaných hliníkových profilů s sebou přináší řešení dvou hlavních otázek. První z nich je zajištění ideální tuhosti upnutí polotovaru. Upnutí je možné považovat za ideálně tuhé, pokud nedochází k vynucenému a samobuzenému kmitání soustavy. Nejvhodnějším řešením je výroba tvarového přípravku - formy, kopírujícího tvar surového profilu (negativ) a zajištěním profilu proti posunutí ve všech axiálních směrech. Toto řešení je vhodné pro velkosériovou výrobu, při které se vysoká cena formy rozptýlí do celého výrobního portfolia. Pro malosériovou a kusovou výrobu je potřeba volit levnější univerzální řešení, dovolující rychlé přetypování produktových zakázek a zajišťující současně tuhost upnutí tak, aby byly dodrženy všechny předepsané rozměrové a geometrické tolerance obrobku. Ve strojírenské praxi jsou v těchto případech nasazovány kombinace hydraulických či pneumatických svěráků opatřených tvarovými podložkami z plastických hmot nebo nerezavějících ocelí. [4] [8] [6]

Druhým úkolem je řešení děleného řezu při frézování a vrtání. S ohledem na průřezový profil polotovaru lze jen stěží zajistit konstantní průřez třísky a řezný výkon nástroje. Ve strojírenské praxi je známo několik možných řešení tohoto bodu.

Při operaci frézování lze použít jednobřité nebo dvoubřité nástroje ze SK, šířka záběru ostří  $a_p$  však nesmí být větší než 1D. Ideálním případem je aplikace s  $a_p=0,5D$ . Díky kombinaci malé hloubky záběru ostří  $a_p$ , malého počtu břitů a vysoké řezné rychlosti je snížena úroveň vynuceného a samobuzeného kmitání. Nevýhodou této aplikace je vysoký počet potřebných řezů k oddělení materiálu a s tím související delší jednotkový výrobní čas.

Druhou volbou je použití dvou-, tří- a čtyřbřitých nástrojů z HSS, přičemž šířka záběru ostří při bočním frézování je rovna výšce celého profilu, tedy  $a_p=H$ . Nevýhodou této volby je nižší řezná rychlost, a jistá úroveň kmitání, která ale neohrožuje stabilitu řezného procesu. Pomocí jednoho, respektive dvou řezů, je tak oddělena požadovaná část materiálu. K výhodám této metody patří nižší cena pořizovaných nástrojů, a v porovnání s variantou jednobřitých nástrojů přibližně stejný čas obrábění dané plochy. Použitý nástrojový materiál je navíc houževnatější, což předchází možnosti náhlého poškození nástroje v případě zakmitnutí děleného materiálu.

### 3.3.1 Vrtání

Jedná se o výrobní metodu, při které je za pomoci dvoubřitého nástroje zhotoven nebo zvětšen předvrtaný otvor. [15] [14] Mezi základní parametry vrtání patří řezná rychlost a posuvová rychlost.

Řezná rychlost  $v_c$  (3.16) je závislá na průměru vrtáku  $D_i$  a otáčkách, tedy:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000} \quad (3.16)$$

kde:  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost,  
 $D_i$  [mm] průměr vrtáku,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] otáčky vřetene.

Posuvová rychlost (3.17) je definována za pomoci posuvu na otáčku  $f$  a otáčkami  $n$ , přičemž:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad (3.17)$$

příčemž:	$v_f$	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost,
	$f$	$[\text{mm}]$	posuv na otáčku,
	$n$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky vřetene.

### 3.3.2 Frézování

Při této metodě je pomocí vícebřitého otáčejícího se nástroje odebrán materiál obrobku ve formě krátkých třísek proměnné tloušťky. Řezný proces je přerušovaný, posuv nejčastěji koná vyráběný díl ve směru kolmém k ose nástroje. Z technologického hlediska rozlišujeme frézování na válcové a čelní, podle toho, kterou částí nástroje je úběr materiálu prováděn. [14] [15] Obě tyto metody se dále dělí na:

- sousledné – smysl rotace nástroje je ve směru posuvu obrobku
- nesousledné – smysl rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku, tloušťka třísky se postupně zvětšuje od 0 do maxima

Řezná rychlost je definována (3.18):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.18)$$

kde:	$v_c$	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	řezná rychlost,
	$D$	$[\text{mm}]$	průměr frézy,
	$n$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky vřetene.

Vedlejší posuvový pohyb (3.19) obrobku (nebo nástroje) je dán druhem nástroje, požadované jakosti povrchu a druhem operace. Pro hrubování se obvykle volí vysoký posuv s velkou šířkou záběru ostří  $a_p$ , tuhosti obrobku a výkonu vřetene.

$$v_f = \frac{f_z \cdot Z \cdot n}{1000} \quad (3.19)$$

příčemž:	$v_f$	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost,
	$f_z$	$[\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}]$	posuv na zub,
	$Z$	$[-]$	počet zubů,
	$n$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky vřetene.

### 3.4 Možnosti optimalizace řezných podmínek v IFE-CR, a.s.

Firma IFE-CR, a.s. disponuje konvenčními stroji vybavenými pohony z kuličkových šroubů a s maximálními otáčkami vřetene  $10\,000 \text{ min}^{-1}$ . Tato kombinace nedovoluje využití jednobřitých nástrojů ze SK s vysokými řeznými a posuvovými rychlostmi. Z tohoto důvodu probíhá proces obrábění za pomoci vícebřitých povlakovaných fréz z rychlořezných nástrojových ocelí.

Vzhledem k tvaru a velikosti polotovaru by bylo velice obtížné matematicky určit optimální řezné podmínky a optimální trvanlivost nástroje podle kapitol 3.1.1 a 3.1.2, z tohoto důvodu je jednodušší upravit a přiblížit řezné podmínky současného stavu ke katalogovým údajům. Tento krok je také možné provést, neboť v rámci IFE-CR, a.s. není nástrojové hospodářství klíčovou otázkou. Naproti tomu zásadní roli hrají jednotkové výrobní časy a TgPV.

Frézovací nástroje jsou v úpravě pro upnutí v kleštině nebo držáku typu weldon. Na základě interních statistik je patrné, že k lomovému poškození nástroje dojde dříve, než ke kritické hranici opotřebení bříty. Nejčastěji dojde k lomu na základě iniciátoru v podobě únavové trhliny v oblasti upínací plošky (weldon) nebo přechodu šroubovice a stopky nástroje. Oba typy poškození jsou zobrazeny na obr. 3.3 a, b. Trvanlivost nejpoužívanějšího nástroje – frézy D12, 3B, TiCN s hrubovacím profilem se pohybuje v závislosti na vyráběném produktu okolo 15 – 40 hodin.

Podobným způsobem bylo zjištěno, že je vhodnější využívat pro kapsová vybrání nesousledné frézování, poněvadž nedochází k nabírání („natahování“) materiálu frézou a je dlouhodobě dosahováno lepší přesnosti obrábění.

Technologie obrábění není v rámci produktové řady nijak svazována přísnými výrobními tolerancemi. Ve většině případů jsou hlavní délkové rozměry dílu tolerovány s přesností  $\pm 0,5\text{mm}$ , polohy otvoru pak s tolerancí  $\pm 0,2\text{mm}$ . Na základě výše uvedeného je patrné, že pro většinu frézovacích operací dostačuje nasazení nástrojů s jemným hrubovacím profilem.

Pro základní sadu nejpoužívanějších nástrojů jsou definovány za pomoci praktických zkušeností, katalogových hodnot a vztahů (3.16-19) řezné podmínky uvedené v příloze 7.

a)



b)



Obr. 3.3 a) nástroj poškozen lomem v oblasti přechodu šroubovice a stopky, b) nástroj poškozen lomem v oblasti upínací plošky.

## 4 NÁVRH OPTIMALIZACE NC PROGRAMU POMOCÍ CAD/CAM SOFTWARE

Pro potřeby firmy IFE-CR, a.s. byly již v dávnější historii, při zavádění softwarového standardu PTC ProEngineer vytvořeny tzv. obráběcí šablony, které umožňují rychlejší generování NC programu. V současné době je k dispozici 10 verzí šablon pro 3 skupiny strojů (dle verze řídicího systému a typu produktu), které jsou v různém stádiu odladění. Soubory obrábění jsou úzce provázány se soubory výkresu – upínacími sestavami obrobku. Pro návrh optimalizace byla provedena analýza všech dostupných vstupních a výstupních souborů, na jejichž základě byly stanoveny optimalizační návrhy. [6]

### 4.1 Optimalizace NC programu

Optimalizace NC programů probíhá s ohledem na dvě hlediska. Prvním hlediskem je maximální výrobnost za časovou jednotku, což znamená redukci nadbytečných drah a zvýšení řezných podmínek nástrojů (viz kapitola 3.1), čímž je dosaženo nejkratšího možného jednotkového výrobního času  $t_{AS}$ . Druhým hlediskem jsou kvalitativní požadavky na obrobené plochy, které nesmí být optimalizací porušeny.

Hlavním cílem optimalizace je tedy vytvoření interních standardů pro parametry procesu obrábění, jako jsou délky náběhu  $L_n$  a přeběhu součásti  $L_p$ , vzdálenosti bezpečnostních rovin  $H_{br}$ , apod. Tyto parametry je vhodné zavést přímo do nastavení CAM systému. Díky tomuto opatření poté odpadá nutnost provádět optimalizaci manuálně - od stolu nebo u stroje - po každém generování NC programu. Ke standardům patří také logické přeuspořádání obráběcích sekvencí ve smyslu jednoho směru a může tak být učiněno automaticky nebo manuálně programátorem. Úspora nákladů pak nevzniká pouze při obrábění, ale již v jeho přípravné fázi. Normativně nejsou tyto parametry stanoveny, existují však doporučení, ze kterých je možno vycházet. [14] Na základě provedené analýzy z kap. 2.5 byly stanoveny parametry uvedené v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Parametry sekvencí

Označení	Název parametru	Hodnota [mm]	Název parametru v CAM Creo
$L_n$	délka náběhu *	10	EXIT/START
$L_p$	délka přeběhu *	10	EXIT/END
$L_k$	délka nájezdu na korekci	2	APPROACH/EXIT
B	bezpečná vzdálenost od polotovaru při nájezdu nástroje vedle kusu	2	
$H_{brG54}$	výška bezpečné roviny souřadného systému G54 **	100	RETRACT
$H_{brG55}$	výška bezpečné roviny souřadného systému G55**	120	RETRACT
$H_{brG56}$	výška bezpečné roviny souřadného systému G56**	80	RETRACT
$h_{zpp}$	hloubka záběru pod profil	2	AXIS SHIFT
$H_{G01}$	vzdálenost od obrobku při sepnutí pracovního posuvu G01	5	CLEAR DIST

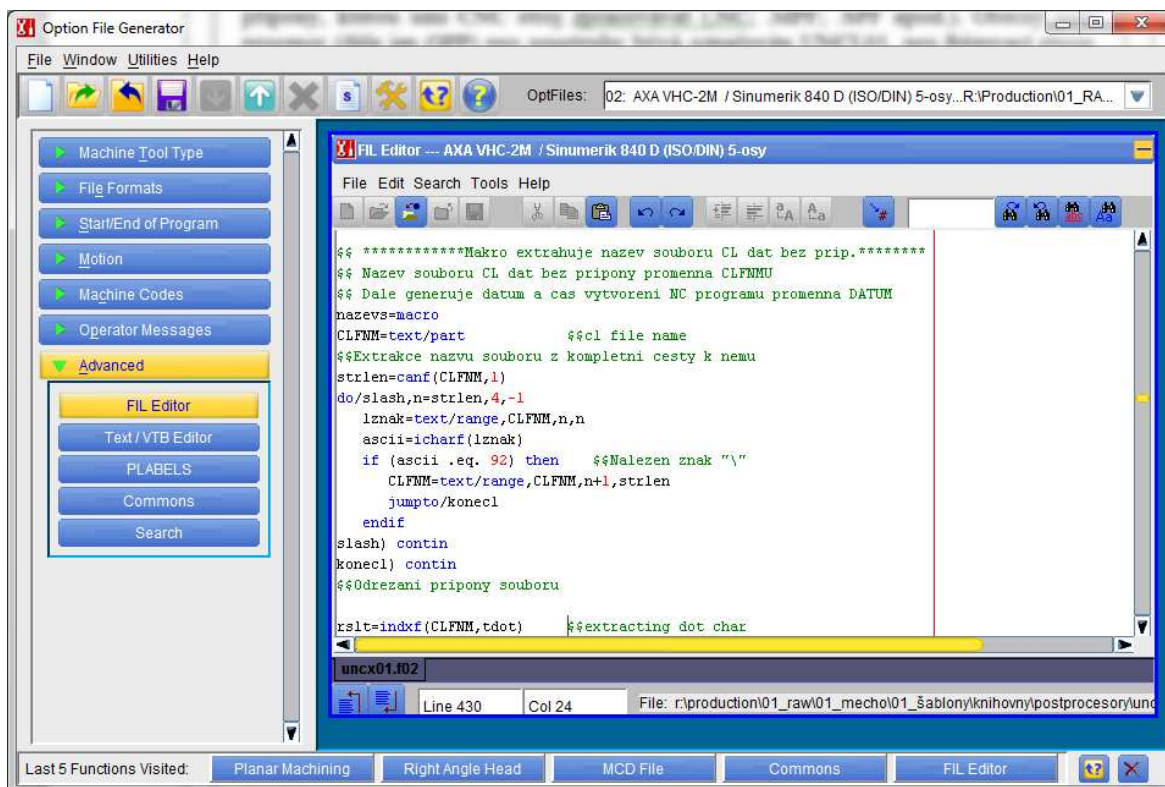
Pro položky označené \* byl odvozen vztah 4.1 uvedený v kapitole 4.5.3.

Položky označené \*\* jsou závislé na tvaru surového polotovaru.



## 4.2 Post procesing a generovaný NC program

Optimalizaci generovaného programu je možné zajistit změnou výchozích CAM šablon (kapitoly 4.3 a 4.4) a odladěním souborů typu FIL, které upravují generovaný NC program z post processoru. Zásahy do tohoto souboru mohou mít fatální následky a je tedy nesmírně důležité provádět změny pouze na lokálně vytvořených kopiích, kterými je možné po jejich plném odzkoušení nahradit původní soubory.



Obr. 4.1 Prostředí pro úpravu FIL souboru.

Na obr. 4.1 je zobrazeno uživatelské rozhraní editoru FIL souboru. Optimalizovaný NC program je uveden v příloze 11.

### 4.2.1 Požadavky výroby na generovaný NC program

U generovaných programů pro stroje s řídicím systémem Sinumerik 840C neodpovídá pozice nástroje v zásobníku (příkaz T) a délková korekce (příkaz D) nástroje uvedené v programu zažitým konvencím a používané tabulce nástrojů. Manuální korekce těchto údajů přímo ve stroji prodlužuje potřebný čas pro odladění prototypu a především je velice náročná, neboť v rozsáhlém programu ztratí operátor velice rychle orientaci. [32]

Řešení:

Pro správné nastavení je potřeba ve FIL souboru upravit makro, načítající korekci nástroje a zpracovávající číslo nástroje. Hodnota správného čísla korekce je v registru uložen na další pozici, tudíž stačí přepsat pouze hodnotu registru. Generovaná pozice nástroje pak odpovídá hodnotě uložené v CAM Creo. Zápis zdrojového kódu makra OFSTNO vypadá následovně:

```

$$ *****O F S T N O*****
$$ Makro pro zadani korekce nastroji!!
$$ Prikaz OFSTNO vlozit do CL dat na pozadovane misto pres Customize,
Insert CL Command
cimfil/on,OFSTNO
ofval=postf(7,5) $$ Hodnota korekcniho registru byla ofval=postf(7,4)
ofvals=text/convf,ofval,2,0,0,0,4
insert/'D',ofvals,'#'
cimfil/off

```

#### 4.2.2 Vizualizace

Všechny generované NC programy postrádají vizuální rozdělení do podoby bloků tak, aby obsluha CNC stroje získala rychlý přehled o prováděných operacích a nástrojích, které je v případě potřeby upravit.

Řešení:

Níže je uveden příklad pro FIL soubor určený pro ŘS Sinumerik 840D. V tomto případě stačí nalézt makro LOADTL načítající nové nástroje a po této výměně zařadit příkaz:

```
insert/';-----#'
```

Takto upravené makro zařadí oddělovač pouze na konce sekvencí a nefiguruje tak nadbytečně i na začátku programu. Vzhledem k tomu, že komentáře dílčích kroků v sekvencích jsou dodávány ručně programátorem, ve FIL souboru neexistuje makro pro jeho konverzi. V případě potřeby vizuálního oddělení dílčích kroků je potřeba již při programování dílu zařadit tento oddělovač ke komentáři kroku:

```
INSERT/;komentář kroku sekvence#
```

```
INSERT/;-----#
```

Upravené makro LOADTL má posléze tvar:

```

$$ *****
$$ *          L O A D T L          S e c t i o n s          *
$$ *****
CIMFIL/ON,LOADTL
tn=postf(7,4)    $$Cislo nastroje
if (ftool .eq. 0) then
    %save_cl
    insert/'; #'    $$ Zacatek vkladani nulovych bodu
    call/dnb
    insert/'L12#'
    insert/'G0 A0#'
    insert/'R31=0#'
    insert/'L8#'
    %restore
else
    %save_cl
    insert/'L12 ;ZRUSENI VSECH TRANSFORMACI#'

```

```

L12=1    $$ Flag na zrunou transformaci L12=1 -transformace je zrusena
insert/'G0 G53 Z750 D0 ;(ODJEZD NA BEZP. VZDAL. V OSE Z)#'
insert/'G0 A0#'
insert/' ;-----# '
%restore
endif
%put
tchg=1
if (oktool .eq. 1) then
    plabel/option,30,to,1    $$ PPRINT, INSERT numbering OFF
    pprint/ppr              $$ Pprint poznamky k nastroji
    plabel/option,30,to,0    $$ PPRINT, INSERT numbering ON
endif
$$ Rozliseni první nebo další výměny nástroje
if (ftool .ne. 0) then
    $$ insert/'L9(0,0,0)#'
    $$ insert/'G0 G53 Z750 D0 ;(ODJEZD NA BEZP. VZDAL. V OSE Z)#'
    #g53=1    $$ Flag na naježd do ref. bodu stroje
else
    ftool=tn
endif
insert/' G0 G40 G90 G94 G64#'    $$ Nove 25.04.2006
%simul_on
GOHOME    $$ Fiktivní
%simul_off
    repeat/off
    repeat/B,X,Y,Z,G,0,all
gvalfl=1    $$ Po výměně nástroje
insert/'D1#'
ofval=1    $$ C. kor.prep.
CIMFIL/OFF

```

### 4.3 Upínací plán sestavy

Upínací plán je jediným zdrojem informací, ze kterého může operátor čerpat. Z tohoto důvodu je potřeba, aby byl vytvořen co nejprůhledněji se všemi informacemi, které mohou urychlit přetypování produktu.

#### 4.3.1 Doplnující informace

Na šabloně upínacího plánu chybí textové poznámky obsahující dodatekové informace o projektu, zrcadlových dílech, atypických podložkách pro upnutí a další doplňující informace. Programátor je nucen všechny poznámky vytvářet ručně, což prodlužuje

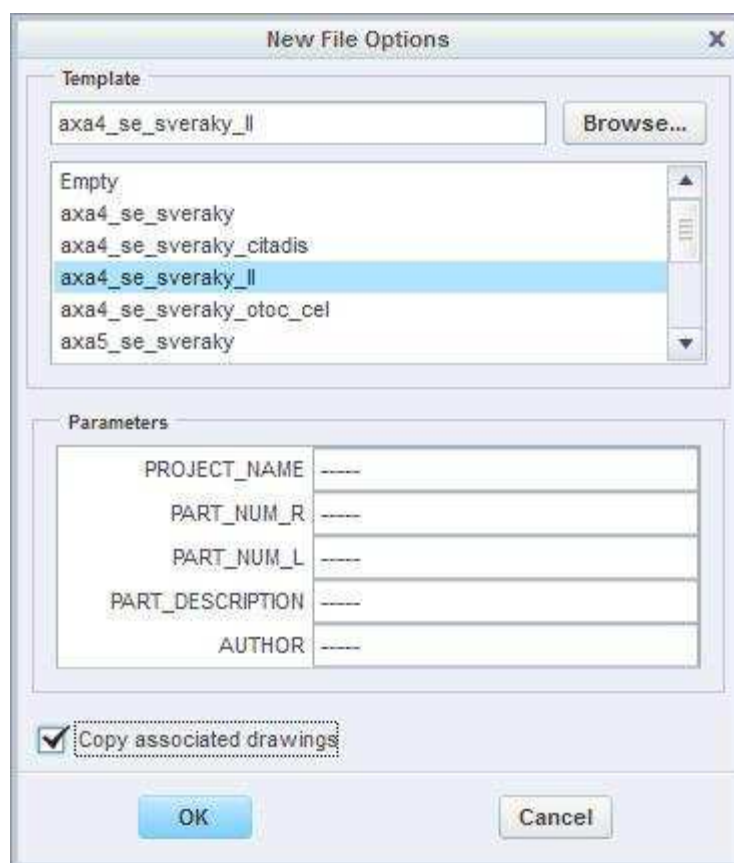
přípravnou fázi. Neexistuje seznam standardních údajů, každý programátor uvádí pouze údaje, které jsou z jeho pohledu důležité.

Řešení:

Do jednotlivých obráběcích šablon jsou přidány parametry (viz tab. 4.2), které jsou pak automaticky předány do upínacích plánů sestav (obr. 4.2). Parametry jsou ve výkresovém prostředí vyvolávány pomocí znaku & a názvu parametru, např. &PROJECT\_NAME. Běžná textová poznámka se tak díky speciálnímu znaku stane proměnnou, jejíž hodnota je obnovena při každé provedené obnově dokumentu.

Tab. 4.2 Vstupní parametry MFG souboru.

Název parametru	Popis parametru
PROJECT_NAME	název projektu nebo číslo zákazníka
PART_NUM_R	číslo obrobku pravého
PART_NUM_L	číslo obrobku levého
PART_DESCRIPTION	popis obrobku, charakteristické označení
AUTHOR	jméno autora



Obr. 4.2 Nastavení nového souboru a uživatelské parametry.

#### 4.3.2 Formát upínacího plánu

Formát upínacího plánu sestavy není přehledný, prostor zaplněný tabulkou nástrojů a sekvencí mate operátora při seřizovací činnosti. Náhled na rozmístění svěráků a obrobku

musí být přizpůsoben těmto generovaným tabulkám a v mnoha případech je tak zmenšen na špatně rozlišitelnou velikost, viz příloha 3.

Řešení:

Zpřehlednění výkresu je dosaženo změnou rozvržení upínacího plánu. Ten je rozdělen na dva listy. První list obsahuje zobrazení sestavy upnutí dle ISO promítání doplněné o detaily nulových bodů obrobku pro obrábění. Na tomto listu jsou také údaje o obrobku získané z parametrů obráběcí sestavy (viz podkapitola 4.3.1). V případě potřeby je k dispozici větší prostor, na kterém je možné vizuálně upozornit operátora na specifické požadavky upnutí nebo kritickou oblast obrábění, viz příloha 4.

Druhý list obsahuje původní generovanou tabulku použitých nástrojů a obráběcích sekvencí. Údaje do této tabulky jsou získány pomocí parametrů uvedených v tab. 4.3.

Tab. 4.3 Parametry generované na upínacím plánu

Syntaxe parametru	Funkce parametru
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.tool_material</code>	pozice nástroje v zásobníku
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.tool_id</code>	ID nástroje, název nástroje
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.cutter_diam</code>	průměr nástroje
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.tool_comment</code>	komentář nástroje
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.name</code>	název sekvence
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.tool_id</code>	ID nástroje použitého pro sekvenci
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.spindle_speed[.0]</code>	otáčky vřetene
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.cut_feed[.3]</code>	pracovní posuv
<code>&amp;rpt.rel.zmena_hodnoty</code>	změněná hodnota pracovního posuvu
<code>&amp;mfg.actoper.ncseq.description</code>	komentář NC sekvence

#### 4.4 Šablona obráběcí sestavy

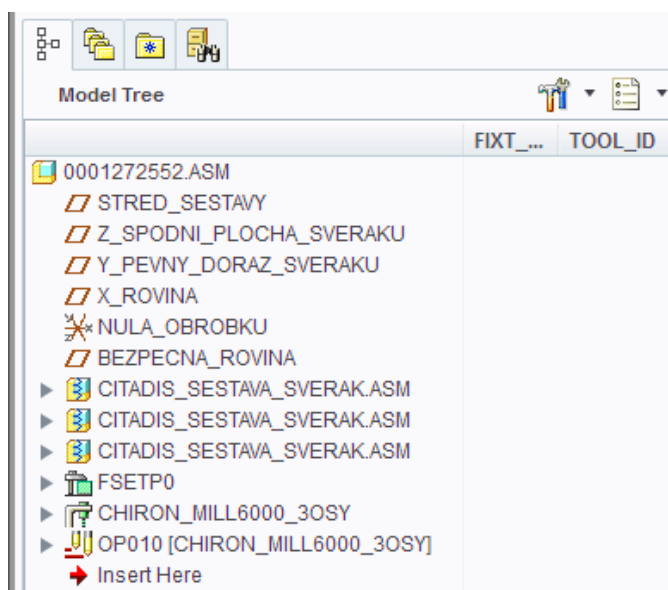
Šablona vytvořená jako podklad pro obráběcí sestavy je ideálním prostorem pro přednastavení všech informací a parametrů potřebných nejen při vizuální simulaci NC programu, ale potřebných pro předání do NC programu k řízení stroje. Soubory šablon mají podobně jako sestavy příponu .ASM, nicméně je lze konfigurační volbou vizuálně oddělit a přiřadit jim samostatné ikony.

##### 4.4.1 Rozvržení a vizualizace

Ačkoliv je poloha doplňujících souřadných systémů G55, G56 a G57 u většiny typů profilů známá a neměnná, nejsou tyto CSYS včetně jejich bezpečnostních rovin k dispozici (obr. 4.3). To vede k nutnosti tyto souřadné systémy opětovně vytvářet při každém založení nového obrobku. Prodlužuje se tím TgPV a vznikají nestandardní formáty souborů.

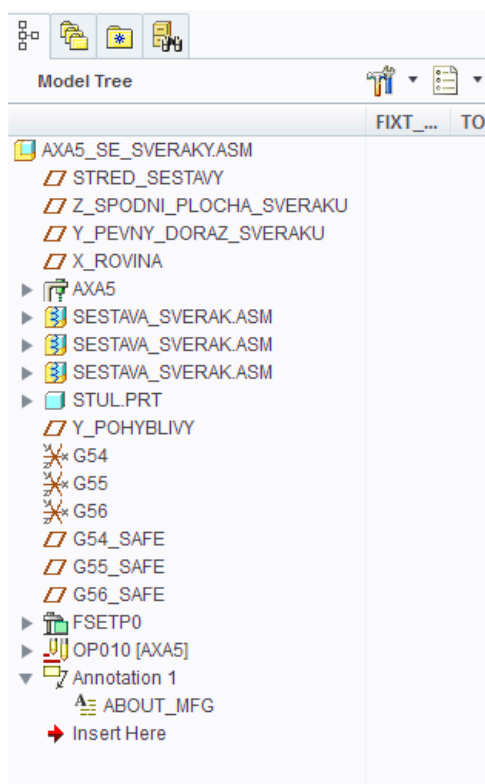
Řešení:

Pro lepší práci se souřadnými systémy ve výkresovém prostředí Crea je potřeba vytvořit vlastní hladiny již samotné sestavě (obr. 4.4 b). Do těchto hladin jsou pak uloženy souřadné systémy G54, G55 a G56 včetně jejich bezpečnostních rovin (obr. 4.4 a). S těmito hladinami je pak možné manipulovat na upínacím plánu, zobrazovat a skrývat je. Každý souřadný systém má v nově vytvořeném layoutu upínacího plánu vlastní detailní pohled, aby bylo možné přesně určit jeho polohu pro odměření před obráběním.



Obr. 4.3 Původní strom obráběcí sestavy.

a)



b)



Obr. 4.4 a) nový strom obráběcí sestavy, b) nastavení hladin v obráběcí šabloně.

#### 4.4.2 Simulace řezného procesu

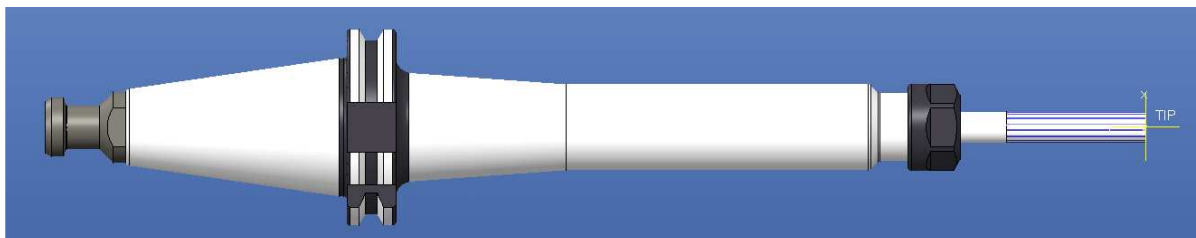
Simulace řezného procesu obsahuje pouze generované nástrojové obálky, což neumožňuje detekovat možné kolize nástroje s obrobkem nebo upínací sestavou. Při odlaďování prototypové výroby tak hrozí vysoké riziko poškození stroje, nástroje a obrobku.

Řešení:

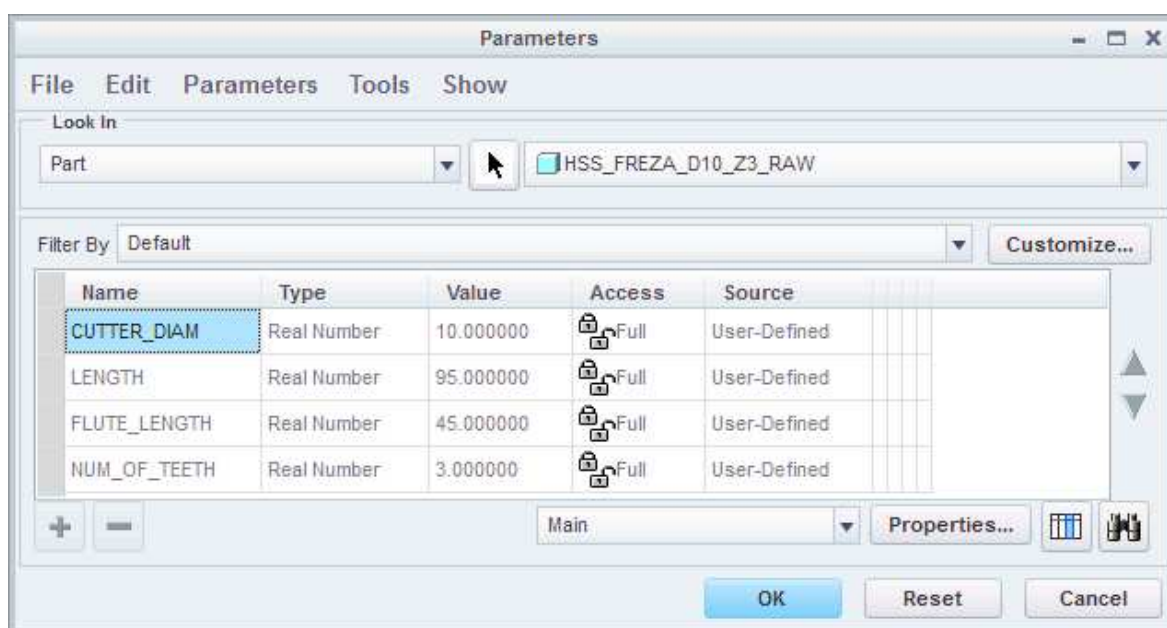
Pro zdokonalení simulace jsou vytvořeny sestavy 3D CAD modelů nástrojů. Pro vytvoření modelu byly použity katalogové materiály a veřejně dostupné normativy týkající se standardních upínacích kuželů a geometrie těla nástrojových upínačů. Nástroje jsou zobrazeny schematicky, s ohledem na zachování geometrie nástroje, která byla převzata z katalogových listů dodavatelů. Vzorový 3D model nástroje je zobrazen na obr. 4.5, výkres sestavy nástroje je uveden v příloze 2. Takto vytvořené modely jsou provázány s obráběcími šablonami. Pro zajištění vzájemné kompatibility a maximálního možného využití parametrického softwaru CAM Creo byly k modelům nástrojů přiřazeny parametry, jež obsahují informace o jeho geometrii, viz tab. 4.3. Ačkoliv je založení těchto parametrů čistě uživatelskou volbou, definice jeho názvu podléhá striktní syntaxi vycházející z CAM souborů, a díky které je možné tyto informace dále zpracovávat ve formátu pseudoproměnných, viz obr. 4.6.

Tab. 4.3 Nejběžnější parametry využívané v CAM modulu PTC Creo

Název parametru	Popis
CSINK_ANGLE	úhel špičky navrtávačku
CUTTER_DIAM	průměr nástroje přes břity
FLUTE_LENGTH	délka břitů nástroje
LENGTH	celková délka nástroje
NUM_OF_TEETH	počet zubů nástroje (k dispozici pouze u frézovacích nástrojů)
TOOL_COMMENT	komentář k nástroji nebo celé sestavě
HOLDER_DIA	průměr držáku nástroje
HOLDER_LEN	délka držáku nástroje
PITCH	stoupání závitu (k dispozici pouze u závitovacích nástrojů)



Obr. 4.5 3D model nástroje.



Obr. 4.6. Parametry zadané na úrovni nástroje.

#### 4.4.3 Zadání řezných podmínek

Řezné podmínky jsou zadávány manuálně při každém použití nástroje, zadávané hodnoty se liší v závislosti na osobních zkušenostech a navrženém postupu obrábění.

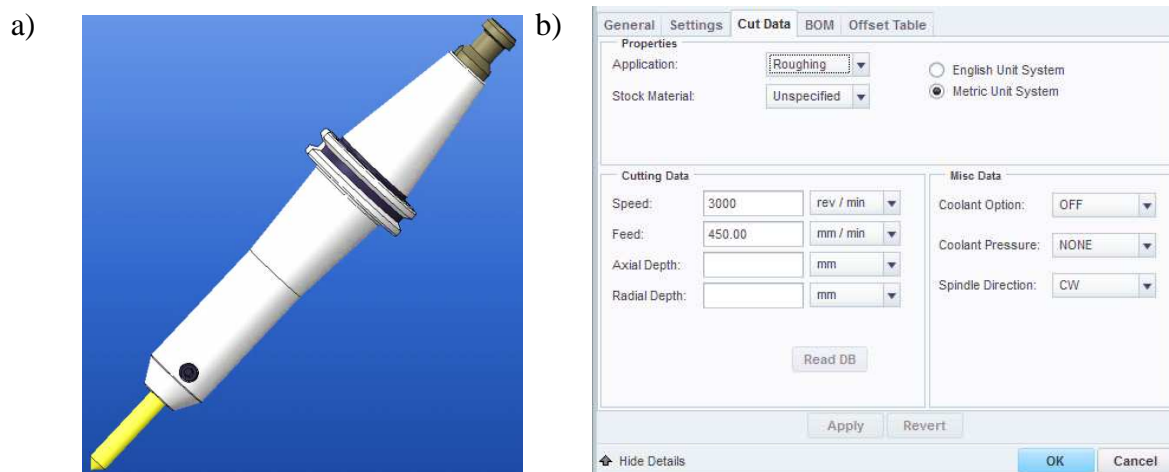
Řešení:

K založeným 3D modelům (obr. 4.7 a), které jsou použity v seznamu nástrojů obráběcích sestav, jsou nastaveny řezné podmínky na základě předchozích zkušeností a katalogových hodnot uvedené v příloze 7. Řezné podmínky byly ověřeny v praktickém příkladu a vyhodnoceny jako vyhovující.

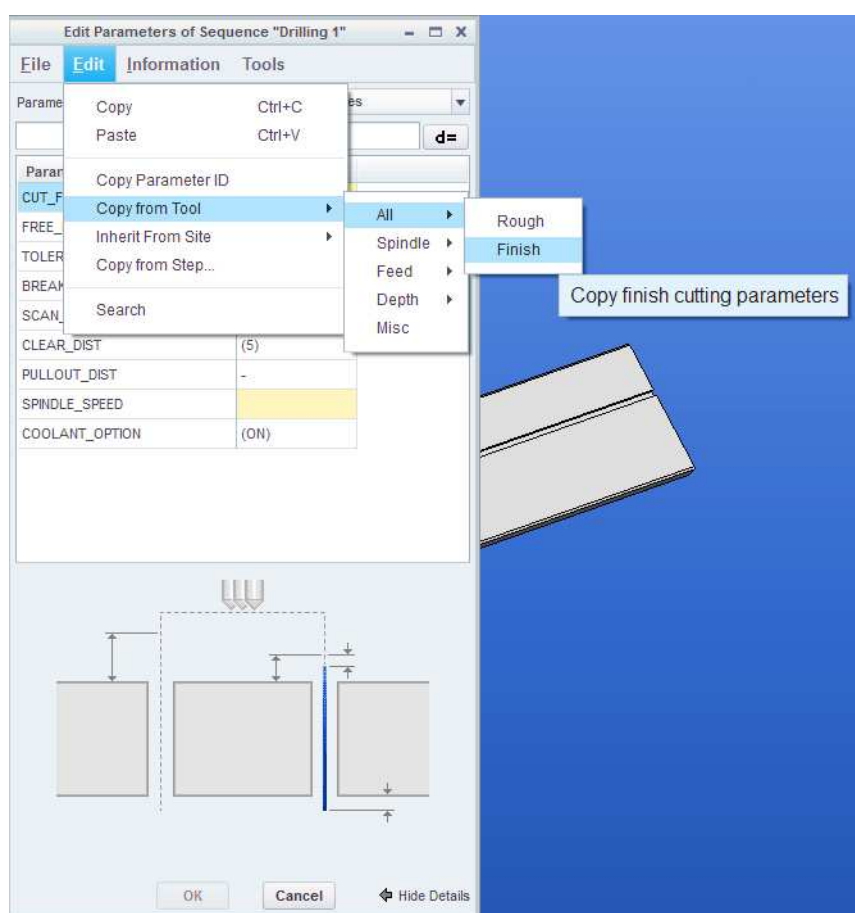
Řezné podmínky se ukládají při zakládání nástroje do karty nástroje „CUT DATA“ pro operaci hrubování a dokončení zvlášť (obr. 4.7 b). Po uložení nástroje v šabloně, již není dále potřeba s řeznými podmínkami manipulovat. Řezné podmínky je možné zadávat ve formátu NC příkazů, tedy otáčky vřetene S a posuv F. Druhou možností je zadání řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu na zub (posuvu na otáčku), ze které se automaticky podle parametrů nástroje (podkapitola 4.4.2) – průměr a počet břitů dopočítají parametry pro obrábění. Tato karta umožňuje nastavení doplňujících parametrů k obrábění jako směr rotace, chlazení, apod.

Při definici obráběcí sekvence lze jednoduše nahrát potřebné parametry přes volby Edit - Copy from Tool - All, zobrazené na obr. 4.8. Takto vytvořené parametry je možné využívat nejen při zadávání sekvencí, ale také při spouštění maker.





Obr. 4.7 a) model nástroje pozice T1, korekce D1, b) parametry nástroje zadané v materiálové kartě.



Obr. 4.8 Nahrání parametrů obrábění do sekvence.

#### 4.4.4 Ověření vytvořených sekvencí

Ověření možnosti kolize nástroje s obrobkem při obrábění kontur je kontrolována přibližným natočením modelu do vhodné polohy a optickým prověřením linie polotovaru a nástroje, chybí exaktní definice nájezdů nástrojů na začátku a konci řezu.

Řešení:

Koncové kontury obrobku jsou ve většině případů zakončeny pod úhlem menším než  $90^\circ$  od průběžné délky profilu. Kontury jsou obráběny hrubovacím a dokončovacím řezem s prodloužením dráhy nástroje přes obrobek a korekcí poloměru nástroje. Pro hodnotu minimální délky prodloužení dráhy nástroje při využití kolmého nájezdu na korekci jsou stanoveny následující podmínky a odvozen exaktní vztah, který dovoluje bezpečný pohyb nástroje v blízkosti obrobku, aniž by došlo ke vzájemnému poškození (viz obr. 4.9).

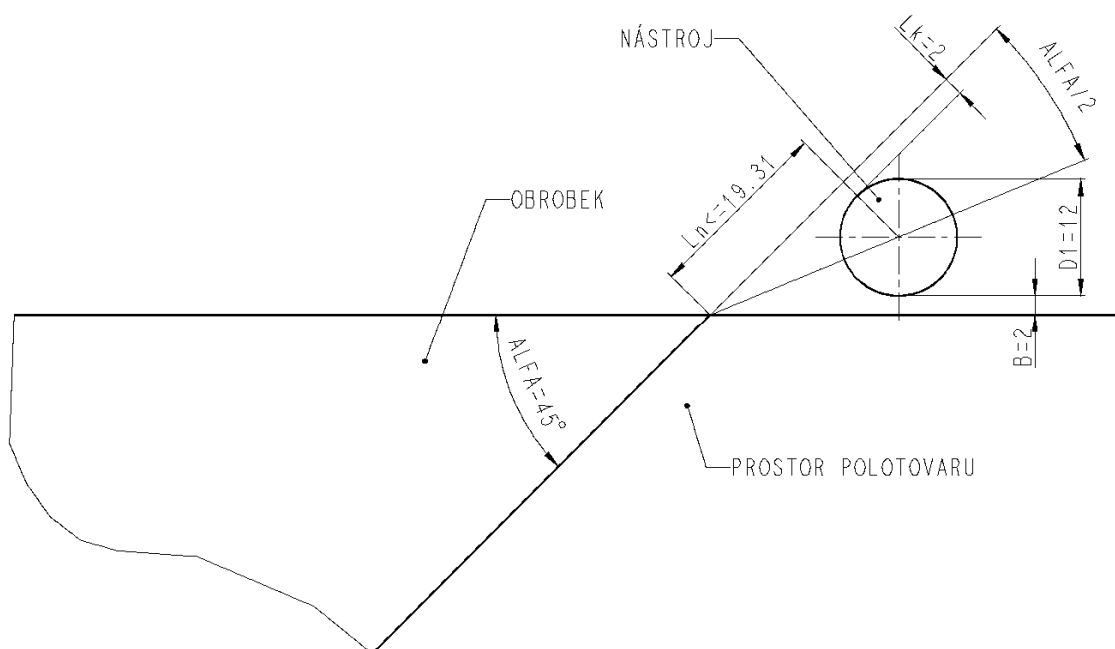
Pokud je dodržena základní podmínka  $L_k=B$ , pak úhel  $\alpha$  je rozdělen napůl a lze definovat  $L_n=f(\alpha)$ .

Minimální hodnota  $L_n$  (4.2) lze podle obr. 4.5 vyjádřit odvozením z funkce tangens (4.1):

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{D1}{2} + 2}{L_n} \quad (4.1)$$

$$L_n = \frac{\frac{D1}{2} + 2}{\tan(\frac{\alpha}{2})} \quad (4.2)$$

Na základě vztahu (4.2) je možné vypočítat hodnoty  $L_n$  a  $L_p$  pro jakýkoliv atypický úhel kontury. V tab. 4.5 jsou uvedeni nejtypičtější představitelé.



Obr. 4.9 Definice bezpečné vzdálenosti u úhlových kontur

Kde:  $\alpha$  (ALFA)  $[\circ]$  - vnitřní úhel kontury,  
 $L_n$  [mm] - délka nájezdu,  
 $L_k$  [mm] - délka nájezdu na korekci,  
 $B$  [mm] - bezpečná vzdálenost nástroje od obrobku,  
 $D1$  [mm] - průměr nástroje.

Tab. 4.5 Hodnoty vypočtené dle vztahu (4.2)

Úhel kontury [ $\circ$ ]	Minimální hodnota $L_n$ , $L_p$ [mm]	$L_k=B$ [mm]
45	19,4	2
43	20,3	
90	8,0	
30	29,9	
35	25,4	
40	22,0	
50	17,2	
60	13,9	

#### 4.4.5 Automatizace rutinních činností

Každou sekvenci (i opakující se) musí programátor zadávat ručně od začátku, což značně prodlužuje přípravu programu. Zadávané řezné podmínky jsou odlišné u každého programátora v závislosti na jeho zkušenostech. Pokud obráběcí operace obsahuje více různých typů vrtacích, navrtávacích a závitovacích cyklů může docházet k opomenutí některých sekvencí, které je poté potřeba doplnit při odlaďování programu.

Řešení:

Pro všechny opakující se činnosti je nejlepší variantou vytvoření maker, která na základě několika málo vstupních parametrů automaticky vygenerují zbytek sekvencí. Úkolem programátora poté pouze zbývá zajistit správný (navazující) sled operací a upravit bezpečnostní nájezdové vzdálenosti od obrobku v závislosti na jeho konkrétním tvaru.

Makra jsou de facto zaznamenané posloupnosti operací, vykonávaných při tvorbě programu. Jeho spuštění probíhá zadáním specifické kombinace kláves. Pokud software nenalezne požadovaný prvek automaticky, požádá uživatele o jeho zadání. Pro zachování univerzálního využití maker, nezávisle na typu profilu, je nezbytné je vytvářet za pomoci prvků, které jsou uživatelsky neutrální. Programátor ve většině případů definuje název doplňkového souřadného systému nebo roviny podle nejbližšího konstrukčního prvku. Jako příklad může posloužit zadávaný souřadný systém a bezpečnostní rovina na počátku každé obráběcí sekvence. Uživatelsky neutrální název souřadného systému je například CSYS nebo KOOSYS, díky čemuž je později velice nízká pravděpodobnost, že by se spuštěné makro navázalo k nevhodnému souřadnému systému. Úkol programátora se takto eliminuje na výběr souřadného systému, bezpečnostní roviny a konstrukčního prvku. Zbylé informace jako nástroj, nebo řezné podmínky jsou generovány automaticky.

Makra jsou automaticky ukládána do uživatelského konfiguračního souboru *config.pro*, aby bylo možné je při každém spuštění znovu využívat a mezi uživateli sdílet. Soubor je možné editovat, Creo používá vlastní „programovací jazyk“, nicméně z bezpečnostních

důvodů se to nedoporučuje. Pro vytvoření makra byly použity standardní hodnoty z tab. 4.1, 4.5, a přílohy 7. Příklad vytvořeného makra pro závit M10HC je uveden v příloze 8.

Vzhledem k charakteru obrobků a způsobu opracování je v tab. 4.6 uveden seznam navrhovaných maker pro zefektivnění rutinních konstrukčně – technologických prvků.

Tab. 4.6 Navržená makra pro šablony – část první

Označení	Název	Popis	Parametry
m00		neobsazeno	funkce byla obsazena v CAM ProE
m01		neobsazeno	funkce byla obsazena v CAM ProE
m02	M4	M4 dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D3,2; T4; D4
			závitování; závitník M4; T12; D12
m03	M4 HC	M4 HeliCoil dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D4,2; T8; D8
			závitování; závitník M4 HC;
m04	M5	M5 dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D4,2; T8; D8
			závitování; závitník M4; T17; D17
m05	M5HC	M5HC dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D5,2; T30; D30
			závitování; závitník M5HC; T20; D20
m06	M6	M6 dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D4,8; T6; D6
			závitování; závitník M6; T15; D15
m07	M6HC	M6HC dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D6,2; T5; D5
			závitování; závitník M6HC; T16; D16
m08		neobsazeno	funkce byla obsazena v CAM ProE
m09	M8HC	M8HC dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D10; T1; D1
			vrtání; vrták D8,2; T10; D10
			závitování; závitník M8HC; T18; D18
m10	M10HC	M10HC dle ČSN 02 1051	navrtání; navrtávák D12; T2; D2
			vrtání; vrták D10,5; T31; D31
			závitování; závitník M10HC; T9; D9
m11	D10H7	Vrtání a vystružení D10H7	atypicky
m12	D8H7	Vrtání a vystružení D8H7	atypicky
m13	D5H7	Vrtání a vystružení D12H7	atypicky
m14	Kontura L	Hrubování a finišování L kontury	fréza D12; T22; D22
m15	Kontura P	Hrubování a finišování P kontury	fréza D12; T22; D22

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

### 5.1 Shrnutí optimalizace

Provedená optimalizace řezných podmínek a přednastavení šablon včetně maker, zajistila nejen zkrácení jednotkového výrobního času  $t_{AS}$ , ale také úsporu na TgPV. Vznikly tak volné výrobní kapacity a prostor pro přípravu další prototypové výroby. V tab. 5.1 jsou uvedeny nové časy, kterých je dosahováno při TgPV. Hodnoty byly získány na základě přeměření časové náročnosti jednotlivých operací.

Vytvořená makra jsou zřejmě nejrychlejším možným řešením v oblasti úspory nákladů a optimalizace NC programu. Je možné je nasadit na každý, typově podobný druh obrobku, které jsou v rámci produktového portfolia společnosti IFE-CR, a.s. vyráběny. Celková časová a finanční úspora je odvislá od konstrukční složitosti obrobku.

Tab. 5.1 Přehled zkrácených časů TgPV.

Operace	Původní čas [min]	Nový čas [min]	$dt_{MAKRO}$ [min]	Komentář
Příprava souřadných systémů	1,9	0	1,9	uloženo v šabloně
Nastavení CSYS do hladin	1,8	0	1,8	uloženo v šabloně
Navrtání	2,0	1,5	4,5	každý typ závitů nezávisle na průměru
Vrtání	2,1			
Závitování	1,9			
Navrtání	2,0	1,6	4,5	každý typ lícovaného otvoru nezávisle na průměru
Vrtání	2,1			
Vystružování	2,0			
Frézování kontury hrubování	2,5	1,4	3,2	
Frézování kontury finiš	2,1			
Zadání parametrů do upínacího plánu	2,2	0	2,2	automaticky generováno

### 5.2 Výpočet úspor po optimalizaci

U konkrétního dílu, na němž byla provedena analýza, bylo díky implementaci řezných podmínek z přílohy 7 dosaženo zkrácení jednotkového strojního času  $t_{AS}$ . Náklady uspořené při obrábění dávky optimalizovaným programem lze vyjádřit pomocí rovnice (5.1).

$$\Delta N_S = \frac{(t_{ASpuv} - t_{ASopt}) \cdot Q}{60} \cdot N_{sn} \quad (5.1)$$

kde:  $\Delta N_S$  [Kč]      rozdíl nákladů na strojní práci při zpracování dávky,  
 $t_{ASpuv}$  [min]      výrobní čas strojní před optimalizací,  
 $t_{ASopt}$  [min]      výrobní čas strojní po optimalizaci,  
 $Q$  [ks]      velikost dávky,

$N_{sn}$  [Kč.hod<sup>-1</sup>] hodinová sazba výrobního střediska.

Po dosazení reálných hodnot bylo z původních 16,1 min dosaženo 12,6 min, což odpovídá zlepšení o 21%. Při velikosti sériové dávky 10 ks (z podkapitoly 1.1.2) a hodinové sazbě 875Kč pak vychází úspora nákladů na dávce po optimalizaci dle (5.2).

$$\Delta N_s = \frac{(16,1 - 12,6) \cdot 10}{60} \cdot 875 = \underline{\underline{510,4Kč}} \quad (5.2)$$

Na analyzovaném dílu jsou závity M10HC, M4HC, M6, pravá a levá koncová kontura zhotovena hrubovacím a dokončovacím řezem. Na základě těchto údajů lze vybrat hodnoty  $dt_{MAKRO}$  z tab 5.1, včetně hodnot pro úpravu upínacího plánu a obráběcí šablony. Přípravný čas a na to navazující náklady, které by bylo možno díky optimalizaci šablon NC programu ušetřit, jsou vyjádřeny rovnicí (5.3)

$$\Delta N_s = \frac{\sum dt_{MAKRO}}{60} \cdot N_{sn} \quad (5.3)$$

kde:  $\Delta N_s$  [Kč] rozdíl nákladů na strojní práci,

$dt_{MAKRO}$  [min] čas kratší díky využití maker,

$N_{sn}$  [Kč.hod<sup>-1</sup>] hodinová sazba výrobního střediska.

Po dosazení hodnot časů z tab. 5.1 do rovnice (5.3) a hodinové sazbě 875Kč je poté možno dosáhnout úspory dle (5.4).

$$\Delta N_s = \frac{4,5 + 4,5 + 4,5 + 2 \cdot 3,2 + 1,9 + 1,8 + 2,2}{60} \cdot 875 = \underline{\underline{376,2Kč}} \quad (5.3)$$

Úspora u tohoto dílu činí  $\sum dt_{MAKRO} = 25,8\text{min}$ , což při průměrné době přípravy NC programu profilu - 4,5 hodiny (podkapitola 2.8) - tvoří 9,5% celkového potřebného času. V porovnání se směnovým časovým fondem programátora (7,5 hod.) pak úspora činí 5,7%.

## DISKUZE

Optimalizace řezných podmínek proběhla pro stávající stav v relativně širokém rozsahu. Další zlepšení je již v současnosti (květen 2014) v technologickém řešení. Jedná se o náhradu vybraných nástrojů z rychlořezné oceli nástroji ze slinutých RO nebo SK. Primárně jsou přitom zvoleny nejfrekventovanější vrtáky a kombinované vrtáky, díky nimž odpadá nutnost navrtávání závitových otvorů.

Modifikované šablony zavádějí standardy do přípravné fáze výroby a předcházejí nekonzistentním podmínkám procesu obrábění. Naprogramovaná makra zjednodušují práci programátora a zkracují tak potřebnou reakční dobu mezi uvolněním výkresové dokumentace a odladěním vzorového kusu na straně stroje. Do budoucna by bylo zřejmě vhodné vytvořit makra také pro zbylé, méně obvyklé konstrukční prvky (např. drážky, úkopy, apod.).

Navazující problematika post procesingu je dosti uzavřené téma, na které se specializuje jen několik málo společností (distributorů softwaru). Získat potřebné podklady pro tuto oblast je tedy dosti náročné, stejně jako navazující editace zdrojového kódu. Většinu úprav je proto nutné provádět metodou experimentu a následných testů za běhu.

Výrobní náklady jsou v dnešní době téma, které je velice často skloňováno ve všech výrobních podnicích. Ve strojírenské praxi se nejčastěji přistupuje k opatřením, redukujícím procesní časy, nebo potřebu přípravné fáze výroby. Z vypočtených hodnot v kapitole 5 je patrný značný vliv implementovaných opatření na celkovou časovou výrobní náročnost a navazující náklady pro produktovou řadu společnosti IFE-CR, a.s. Obecně, jsou úspory přesahující hranici 5% považovány za významný krok kupředu ke zvýšení produktivity.

Při zpracování diplomové práce měl autor možnost využít své poznatky z praxe a předchozí znalosti a zkušenosti z oboru programování PC, díky nimž bylo možné se rychleji adaptovat na syntaxi a sémantiku CAM systému Creo.

Dalším potenciálem pro zlepšení a optimalizaci procesu obrábění by bylo využití nekonvenčních technologií, jako jsou např. obrábění laser, abrazivním vodním paprskem, apod.

## ZÁVĚR

V rámci diplomové práce bylo dosaženo následujících cílů:

- byly stanoveny standardní řezné podmínky a bezpečnostní parametry obrábění, platné pro široký rozsah obrobků,
- na základě provedené optimalizace řezných podmínek došlo u analyzovaného profilu k úspoře 21% obráběcího času,
- díky upraveným šablonám je zkrácena fáze TgPV při každém novém projektu, míra uspořené časových prostředků je odvislá od konstrukčně - technologické náročnosti daného profilu,
- pomocí upraveného OPP je generován program vizuálně přehlednější pro operátora.

Mezi hlavní hlediska, ke kterým bylo v průběhu zpracování diplomové práce přihlédnuto, patří možnosti firmy IFE-CR, a.s., interní standardy společnosti a maximální využití stávajících prostředků bez nutnosti další investic.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **IFE-CR, a.s.** IFE-CR. [Online] 2014. [Vid.: 02. květen 2014.] <http://www.ife.cz/cz/>.
2. **PESA Bydgoszcz SA.** PESA. [Online] PESA Bydgoszcz SA, 2014. [Vid.: 20. duben 2014.] <http://www.pesa.pl/en/>.
3. **IFE Aufbereitungstechnik GmbH.** IFE Bulk. *Company - IFE Aufbereitungstechnik GmbH.* [Online] 2014. [Vid.: 28. duben 2014.] <http://www.ife-bulk.com/en>.
4. **Němečková, Monika.** *Hodnocení nákladů na řezné nástroje při frézování hliníkových profilů ve společnosti IFE-ČR, a. s.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2011. str. 74.
5. **Paseka, Jan.** *Principy štlhlé výroby a jejich implementace na pracoviště CNC.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. str. 45.
6. **IFE-CR, a.s., kolektiv.** *interní zdroje.* Modřice : IFE-CR, a.s., 2014.
7. **Slavíček, Jiří.** *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. str. 28.
8. **SAPA Profiler AB.** *Dizajnový manuál.* Žiar nad Hronom : SAPA Profily, a.s., 2006. str. 163.
9. Bauxit. *Wikipedie.* [Online] 10. únor 2014. [Vid.: 01. květen 2012.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bauxit>.
10. **Ptáček, Luděk.** *Nauka o materiálu II.* Brno : CERM. str. 396. ISBN 80-7204-248-3.
11. **Metra Aluminium.** *Per noi i vostri sogni sono tutti grandi sogni. METRA People.Aluminium.* [Online] [Vid.: 22. září 2013.] <http://www.metra.it/aluminium/>.
12. **České vysoké učení technické, Fakulta strojní.** *Metalurgie Al slitin. Podklady.* [Online] [Vid.: 27. říjen 2013.] <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TSL/Slitiny%20Al.pdf>.
13. **České vysoké učení technické, Fakulta strojní.** *Podklady. Tepelné zpracování slitin Al-Si.* [Online] [Vid.: 27. říjen 2013.] <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TSL/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%A9%20slitin%20Al-Si.pdf>.
14. **Kocman, Karel a Jaroslav, Prokop.** *Technologie obrábění.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
15. **Forejt, Milan a Miroslav Píška.** *Teorie obrábění, tváření a nástroje.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
16. Direct numerical control. *Wikipedie.* [Online] [Vid.: 12. duben 2014.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Direct\\_numerical\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_control).
17. **COSCOM.** *DNC Software - DNC System COSCOM DNC. COSCOM.* [Online] [Vid.: 10. květen 2013.] <http://www.coscom.de/en/dnc-software/dnc-software.html>.
18. **ACAM Systemautomation.** *DNC-System mit direktverbindung. ACAM DNC.* [Online] [Vid.: 12. březen 2013.] <http://www.acam.at/web/index.php?id=392>.
19. **CIMCO Integration.** *CIMCO PDM 7 Professional Production Data Maanagement. CIMCO PDM 7.* [Online] [Vid.: 02. květen 2014.] [http://cz.cimco.com/product\\_pdm\\_description.php3](http://cz.cimco.com/product_pdm_description.php3).

**20. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.**

Počítačová podpora konstruování. *Opory/CAE*. [Online] Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. [Vid.: 29. duben 2014.]

<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/cae.php> .

**21. Píša, Zdeněk a Aleš, Polzer.** Systémy CAD. *ESF - Inovace studijních programů*

*strojírenské technologie*. [Online] Vysoké učení technické v Brně. [Vid.: 11. květen 2014.]

[http://esf.fme.vutbr.cz/modul/3/systemy\\_cad.pdf](http://esf.fme.vutbr.cz/modul/3/systemy_cad.pdf).

**22. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.** CAM/Automatizované řízení výroby. *Siemens PLM Software*. [Online] 2014. [Vid.: 30. duben 2014.]

[http://www.plm.automation.siemens.com/cz\\_cz/plm/cam.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/cz_cz/plm/cam.shtml).

**23. Vero Software.** CAD CAM Manufacturing software. *Vero Software*. [Online] [Vid.:

27. říjen 2013.] <http://www.verosoftware.com/>.

**24. Computer Aided Manufacturing.** *Wikipedie*. [Online] [Vid.: 22. březen 2014.]

[http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_manufacturing](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_manufacturing).

**25. ICAM Technologies.** What is Post-Processing? . *ICAM Product Suite*. [Online] 2014.

[Vid.: 13. duben 2014.] [http://www.icam.com/html/products/whatis/what\\_is\\_post.php](http://www.icam.com/html/products/whatis/what_is_post.php).

**26. NEXNET, a.s.** Nexnet, a.s. - Edgecam. *Edgecamcz*. [Online] [Vid.: 22. říjen 2013.]

<http://www.edgecamcz.cz/>.

**27. FOM Industrie.** FOM Industrie. *FOM Industrie Aluminium, PVC Working Machinery*.

[Online] 18. 04 2014. [Vid.: 30. srpen 2013.]

[http://www.fomindustrie.com/download\\_catalogues](http://www.fomindustrie.com/download_catalogues).

**28. Havlík, Radek.** CNC fézování Heidenhain. *Komplexní vzdělávání*. [Online] [Vid.: 28. březen 2014.]

[http://www.pslib.cz/komplex\\_CNC\\_a\\_CAM/files/Prezentace\\_PDF/Komplex\\_CNC\\_Hk\\_01.pdf](http://www.pslib.cz/komplex_CNC_a_CAM/files/Prezentace_PDF/Komplex_CNC_Hk_01.pdf).

**29. Keller, Petr.** Programování a řízení CNC strojů. *Technická univerzita v Liberci,*

*Fakulta strojní*. [Online] 2005. [Vid.: 21. březen 2014.]

[http://www.kvs.tul.cz/download/cnc\\_cadcam/pnc\\_2.pdf](http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf).

**30. Siemens AG.** Sinumerik 840 sl/ 840DE sl/ 828D, *Základy, Programovací příručka*.

[PDF] Nürnberg, Německo : Siemens, 2010. 6FC5398-1BP20-1UA0.

**31. Mozdřeň, Karel.** G-kód. *G-kód*. [Online] 2008. [Vid.: 10. květen 2014.]

<http://homel.vsb.cz/~moz017/G-code/>.

**32. Austin N.C., Inc.** G-POST/CAM. *Generalized Postprocessor*. [Online] [Vid.: 10. květen 2014.]

[http://bdml.stanford.edu/twiki/pub/Manufacturing/HaasReferenceInfo/V61\\_GPost\\_CD\\_Mannual.pdf](http://bdml.stanford.edu/twiki/pub/Manufacturing/HaasReferenceInfo/V61_GPost_CD_Mannual.pdf).

**33. ALMS s.r.o.** Hliník. *Produkty/Hliník*. [Online] [Vid.: 9. květen 2014.]

<http://www.alms-brno.cz/produkty/1-hlinik/>.

**34. Leinveber, Jiří a Pavel, Vávra.** *Strojnické tabulky*. Úvaly : Albra, 2011.

ISBN 978-80-7361-081-4.

**35. Amari.** Porovnání označení hliníkových slitin podle ČSN-EN-DIN. *amari.at*. [Online]

[Vid.: 12. květen 2014.] [www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf](http://www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf).

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>AC</b>	[-]	Alternating Current, střídavý proud
<b>AIREX<sup>®</sup></b>	[-]	obchodní označení recyklátu využívaného jako výplň
<b>ASCII</b>	[-]	American Standard Code for Information Interchange
<b>CAD</b>	[-]	Computer Aided Design
<b>CAE</b>	[-]	Computer Aided Engineering
<b>CAM</b>	[-]	Computer Aided Manufacturing
<b>CAx</b>	[-]	Computer Aided – počítačová podpora
<b>CL data</b>	[-]	Cutter Location data
<b>CNN</b>	[-]	Celostátní normy a normativy
<b>CSYS</b>	[-]	souřadný systém
<b>CYCLE800</b>	[-]	podprogram pro transformaci CSYS
<b>FCC</b>	[-]	Face Centered Cube
<b>FIL</b>	[-]	Factory Interface Language
<b>FINAL</b>	[-]	segment výroby finálního dveřního křídla
<b>FLASH</b>	[-]	velkokapacitní paměťové zařízení s rozhraním USB
<b>HDD</b>	[-]	Hard Disk Drive
<b>HMI</b>	[-]	Human Machine Interface
<b>HSC</b>	[-]	High Speed Cutting
<b>HSF</b>	[-]	High Speed Feed
<b>HSM</b>	[-]	High Speed Machining
<b>HSS</b>	[-]	rychlořezná ocel
<b>HTML</b>	[-]	Hyper Text Markup Language
<b>HUB</b>	[-]	zařízení k vícenásobnému propojení zařízení typu Ethernet
<b>IRIS</b>	[-]	International Railway Industry Standard
<b>KPI</b>	[-]	Key Performance Index
<b>LAN</b>	[-]	Local Area Network
<b>LP</b>	[-]	LaengsProfil – podélný profil
<b>MECHO</b>	[-]	mechanické opracování

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>NB</b>	[-]	nulový bod
<b>NC</b>	[-]	Numerical Control
<b>OEE</b>	[%]	Overall Equipment Efficiency – celková efektivita strojního zařízení
<b>OPP</b>	[-]	obecný post procesor
<b>OS</b>	[-]	operační systém
<b>PDM</b>	[-]	Product Data Management
<b>PLM</b>	[-]	Product Lifecycle Managemenet
<b>QP</b>	[-]	QuerProfil – příčný profil
<b>RAW</b>	[-]	segment výroby hrubého dveřního křídla
<b>RN</b>	[-]	Rimini, oblast Itálie
<b>RO</b>	[-]	rychlořezná ocel
<b>RS232</b>	[-]	sériové rozhraní
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid
<b>TCP/IP</b>	[-]	Transmission Control Protocol/Internet Protocol suite
<b>TgPV</b>	[-]	technologická příprava výroby
<b>TIG</b>	[-]	Thungsten Inert Gas
<b>TPS</b>	[-]	Toyota Production System
<b>TPV</b>	[-]	technická příprava výroby
<b>TPV</b>	[-]	technická příprava výroby
<b>TZ</b>	[-]	tepelné zpracování
<b>V24</b>	[-]	sériové rozhraní
<b>VB</b>	[-]	charakteristické opotřebení břitů
<b>apod.</b>	[-]	a podobně
<b>atd.</b>	[-]	a tak dále
<b>atp.</b>	[-]	a tak podobně
<b>kWh</b>	[-]	kilowatthodina
<b>mil.</b>	[-]	milion
<b>min</b>	[-]	minuta
<b>např.</b>	[-]	například

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>tz<sub>n</sub></b>	[-]	to znamená

Symbol	Jednotka	Popis
<b>B</b>	[mm]	bezpečná vzdálenost nástroje od obrobku
<b>C<sub>v</sub></b>	[-]	konstanta
<b>D<sub>i</sub></b>	[mm]	průměr vrtáku
<b>K<sub>TN1</sub></b>	[-]	konstanta vyjádřená pro specifický druh činnosti, např. soustružení
<b>K<sub>TN2</sub></b>	[-]	konstanta vyjádřená pro specifický druh činnosti, např. soustružení
<b>K<sub>TV</sub></b>	[-]	konstanta závislá na parametrech obrábění
<b>L</b>	[mm]	soustružená dráha
<b>L<sub>k</sub></b>	[mm]	délka nájezdu na korekci
<b>L<sub>n</sub></b>	[mm]	délka nájezdu
<b>N<sub>N</sub></b>	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na 1 obrobek
<b>N<sub>s</sub></b>	[Kč]	náklady na strojní práci
<b>N<sub>sm</sub></b>	[Kč.min <sup>-1</sup> ]	minutová sazba stroje
<b>N<sub>sn</sub></b>	[Kč.hod <sup>-1</sup> ]	hodinová sazba výrobního střediska
<b>N<sub>T</sub></b>	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu na trvanlivost bříty
<b>N<sub>V</sub></b>	[Kč]	náklady na vedlejší práci.
<b>N<sub>Vm</sub></b>	[Kč.min <sup>-1</sup> ]	minutová sazba na vedlejší práce
<b>Q</b>	[ks]	velikost dávky
<b>Q<sub>T</sub></b>	[-]	počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje
<b>T</b>	[min]	trvanlivost
<b>T<sub>optV</sub></b>	[min]	optimální trvanlivost
<b>Z</b>	[-]	počet zubů
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>c<sub>T</sub></b>	[-]	konstanta
<b>dt<sub>MAKRO</sub></b>	[min]	čas kratší díky využití maker
<b>f</b>	[mm]	posuv

$f_z$	[mm]	posuv na zub
$m$	[-]	exponent
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky obrobku
$t_A$	[min]	operační čas jednotkové práce
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$t_{ASopt}$	[min]	výrobní čas strojní po optimalizaci
$t_{ASpuv}$	[min]	výrobní čas strojní před optimalizací
$t_{AV}$	[min]	jednotkový vedlejší čas
$t_{AX}$	[min]	čas jednotkové nepravidelné obsluhy
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_{copt}$	[m.min <sup>-1</sup> ]	optimální řezná rychlost
$v_{cT/VB}$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost při trvanlivosti T pro opotřebení VB
$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
$x_v$	[-]	exponent
$y_v$	[-]	exponent
$\Delta N_s$	[Kč]	rozdíl nákladů na strojní práci při zpracování dávky
$\alpha$	[°]	vnitřní úhel kontury
$\tau$	[-]	koeficient čistého času řezu

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Ukázka souboru nastavení pro Sinumerik 840D
Příloha 2	Výkres sestavy nástroje
Příloha 3	Ukázka původního upínacího plánu
Příloha 4	Ukázka nového rozložení upínacího plánu 1,2
Příloha 5	Ukázka .NCL souboru
Příloha 6	Ukázka .LST souboru
Příloha 7	Upravené řezné podmínky
Příloha 8	Vzorová ukázka makra pro závit M10HC
Příloha 9	Výkres součásti
Příloha 10	Analýza původního NC programu
Příloha 11	Optimalizovaný NC program

## **PŘÍLOHA**

Soubor příloh je umístěn v samotném PDF souboru.